

JP2002333536

Title:

COMPENSATOR FOR WAVELENGTH DISPERSION AND LIGHT TRANSMISSION SYSTEM USING THE SAME

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a micro and inexpensive compensator for wavelength dispersion, of which dispersion compensation amount is variable, and to provide a light transmission system in which the compensator is used. **SOLUTION:** The system is so composed that the wavelength dispersion is compensated by making use of the dispersion characteristic of light which propagates through defects in a photonic crystal. The system is composed of a waveguide array 1 on which a plurality of dispersion compensation waveguides 5 having dispersion compensation amounts different from one another is provided, a driving device 2 for driving the waveguide array 1, optical fibers 3 and 4 for input and output of an optical signal. The dispersion compensation waveguides 5 is composed of an ordinary waveguide 6 and a photonic crystal defect waveguide 7 which is responsible for the dispersion compensation, and the length of every waveguide 7 is made different from one another so that the dispersion compensation amount is made different.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-333536

(P2002-333536A)

(43) 公開日 平成14年11月22日 (2002. 11. 22)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	サーチコード [*] (参考)
G 0 2 B 6/12		C 0 2 B 6/12	Z 2 H 0 4 7
H 0 4 B 10/02			N 5 K 0 0 2
10/18		H 0 4 B 9/00	M

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2001-141290(P2001-141290)

(22) 出願日 平成13年5月11日 (2001. 5. 11)

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 細見 和彦

埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会

社日立製作所基礎研究所内

(72) 発明者 勝山 俊夫

埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会

社日立製作所基礎研究所内

(74) 代理人 100068504

弁理士 小川 勝男 (外2名)

最終頁に続く

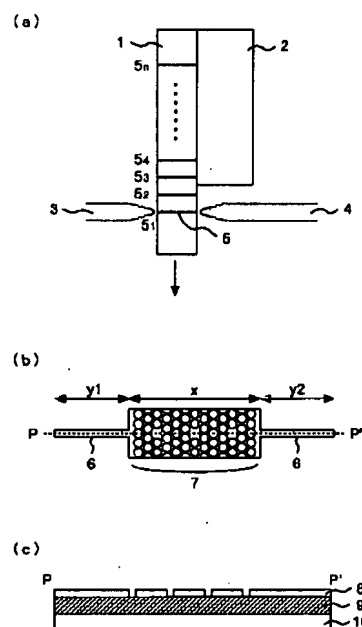
(54) 【発明の名称】 波長分散補償器、及びそれを用いた光伝送システム

(57) 【要約】

【課題】超小型で、低コストで、分散補償量が可変な波長分散補償器およびそれを用いた光伝送システムを提供する。

【解決手段】フォトニック結晶中の欠陥を伝播する光の分散特性を利用することによって、波長分散を補償する構成とした。互いに異なる分散補償量の分散補償導波路5を複数個設置した導波路アレイ1と、導波路アレイ1を駆動するための駆動装置2と、光信号の入出力のための光ファイバー3、4から構成される。分散補償導波路5は、通常導波路6と分散補償を担うフォトニック結晶欠陥導波路7で構成され、導波路7の長さを1本1本変えて、分散補償量を異ならせた構成とする。

図 1



【特許請求の範囲】

【請求項1】光パルス伝送路における伝送媒体の波長分散を補償する波長分散補償器において、少なくとも2種類以上の屈折率の異なる媒質の周期構造中に不均一要素を導入したフォトニック結晶を用いて分散補償導波路を構成し、前記フォトニック結晶の不均一要素を伝播する光の分散特性を用いて、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項2】前記フォトニック結晶の不均一要素とその周囲の周期構造により結合した共振器を形成し、それを用いて前記波長分散の補償を行うよう構成したことを特徴とする請求項1記載の波長分散補償器。

【請求項3】前記分散補償導波路における、前記フォトニック結晶の占める導波路部分の長さを変化せしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする請求項1又は2記載の波長分散補償器。

【請求項4】前記分散補償導波路における、前記フォトニック結晶の格子定数を変化せしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする請求項1又は2記載の波長分散補償器。

【請求項5】光入力信号の切替手段と、同一平面上に並置された、異なる波長分散を有する複数の分散補償導波路とを有し、かつ、前記分散補償導波路の各々が、結合した共振器を備えてなり、前記切替手段によって前記分散補償導波路を選択することにより、光伝送路における波長分散の補償量を制御するよう構成したことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項6】入力側光学系と異なる波長分散を有する複数の分散補償導波路からなる導波路アレイと、前記導波路アレイを移動せしめる駆動装置と、出力側光学系とを少なくとも備え、かつ、前記分散補償導波路の各々が、結合した共振器を備えてなり、前記導波路アレイを前記駆動装置で移動することによって光パルスが通過する前記分散補償導波路を選択し、光伝送路における波長分散の補償量を制御するよう構成したことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項7】前記結合した共振器が、少なくとも2種類の屈折率の異なる媒質の周期構造中に不均一要素を導入したフォトニック結晶を用いて形成されてなることを特徴とする請求項5又は6記載の波長分散補償器。

【請求項8】前記分散補償導波路の各々における、前記フォトニック結晶の占める導波路部分の長さを異ならしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償量を制御せしめてなることを特徴とする請求項7記載の波長分散補償器。

【請求項9】前記分散補償導波路の各々における、前記フォトニック結晶の格子定数を異ならしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償量を制御せしめてなることを特徴とする請求項7記載の波長分散補償器。

【請求項10】請求項1記載の波長分散補償器を用いて、波長毎に光伝送路における波長分散を補償するよう構成したことを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信システムにおいて、光パルス伝送路における光ファイバーなどの伝送媒体の波長分散を補償するための波長分散補償器に関する。

【0002】

【従来の技術】光伝送システムは、通常、光信号の伝送媒体として高純度のシリカ光ファイバーを用いる。しかしながら、光ファイバーは波長分散を持つ為に、一定の波長広がりをもつ光信号パルスを伝送するとパルス波形が劣化する。光ファイバーの分散による光パルス波形の劣化は、光伝送システムの伝送距離や伝送容量を制限する大きな要因となる。このため、大容量光伝送システムにおいては、この波長分散を打ち消す技術が重要となる。例えば、光ファイバーの分散と逆の分散を有する光学系を光伝送路に挿入すれば、ファイバーの分散は相殺され、劣化した波形を修復することができる。

【0003】従来技術としては、符号が逆で絶対値の大きな分散を有するファイバー（分散補償ファイバー）を用いて分散を補償するという技術が実用化されている。分散補償ファイバーは、所望の特性を再現性よく実現できる、補償可能な帯域が広い、等の特徴があり広く用いられている。しかしながら、分散補償ファイバーの単位長さあたりの分散補償量は -20 ps/nm/km 程度と小さく、所望の分散量を得ようとすると非常に長いファイバーが必要となる。このため、小型化が不可能で、且つコストもかかるという問題がある。

【0004】波長分散補償器の小型化を目指した最近の技術として、二種類以上の屈折率の異なる媒質の多次元構造、即ちフォトニック結晶を用いた波長分散補償器が提案されている。フォトニック結晶を透過する光は、特有の分散特性を示すことが知られており、所望の波長の光に対し、適切な格子構造・周期・媒質の屈折率差を選択すると、大きな分散を得ることができる。例えば、特開2000-121987号公報にその具体例が開示されている。この波長分散補償器は、Si（シリコン）基板に二次元フォトニック結晶を作製し、分散を補償するというもので、長さ5mmで数十ps/nmの分散量を得ている。

【0005】しかしながら、二次元フォトニック結晶中を伝播する光は、散乱による損失が避けられないとされており、特開2000-121987号公報の開示例では挿入損失という点について考慮されていなかった。さらにまた、フォトニック結晶の分散関係を利用する場合は複雑な分散カーブの一部を局所的に用いることになり、所望の性能を得る為には極めて高度な作製精度が求

められるとともに設計の自由度は限られることになる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】従来技術に述べたように、長距離光ファイバー通信における分散補償に関しては既に実用化されているものもあるが、小型で低コストな分散補償器を実現できてはいない。

【0007】また、伝送容量の増大に伴い、多数のチャンネルをより高密度に、広い波長領域にわたって用いることが必要になってきており、これに伴って波長分散をより精密に保証することが要求されている。さらにまた、外気温の変動による物性常数の変化等によって波長分散が時間変化するという課題を有するが、従来の分散補償の方式では、補償できる分散量は固定であり、時々刻々変化する光ファイバー中での波長分散を補償することはできない。このような課題に対応するため、状況に応じて柔軟かつ精密に補償量を変化できる分散補償器が求められる。

【0008】そこで、本発明の目的は、超小型で、低コストで、分散補償量が可変な波長分散補償器及びそれを用いた光伝送システムを提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による波長分散補償器は、フォトニック結晶の欠陥モードを用いて結合微小共振器導波路を構成し、かかる導波路を伝播する光の分散特性を用いることによって波長分散補償を行うことを特徴とする。

【0010】本発明の原理と効果の説明にあたって、まずフォトニック結晶の欠陥が微小共振器として働く原理を説明する。次に、結合微小共振器導波路の概念と伝播特性を示し、これを用いた分散補償の原理を説明する。

【0011】フォトニック結晶とは、屈折率の異なる二つあるいはそれ以上の数の媒質を組み合わせた多次元周期構造のことである。図2に示すのは、フォトニック結晶のうち、二次元フォトニック結晶と呼ばれるものの一例である。図2は、紙面と水平方向には周期構造を有し、垂直方向の構造は一様な構造の断面図である。誘電率 ϵ_1 の媒質に誘電率 ϵ_2 の円柱が三角格子状に配置されている($\epsilon_1 > \epsilon_2$)。円柱の部分が空洞の場合は、 $\epsilon_2 = 1$ である。図2中、 a は格子定数、 r は円柱の半径を表す。

【0012】フォトニック結晶を伝播する光の波数と周波数の関係を示した図を、フォトニックバンド図という。図3は、図2の構造において、 $\epsilon_1 = 3.5$ 、 $\epsilon_2 = 1$ 、 $r/a = 0.45$ としたときのTMモードに対するフォトニックバンド図である。ここで、TMモードとは電場が紙面と垂直のモードのことを指す。縦軸は規格化周波数($\omega a/2\pi c$)、横軸は第一ブリルアンゾーン内で規格化した波数ベクトル($k a/2\pi$)を表す。 c は真空中の光速、 ω は光の角周波数、 k は波数をそれぞれ表す。図2の三角格子は六方対称に対応し、形成される

ブリルアンゾーンは図3中に図示する正六角形構造である。正六角形の頂点がK点、各辺の midpoint がM点、波数が0である点が Γ 点である。

【0013】図3中に斜線で図示するように、特定の(規格化)周波数領域では第一ブリルアンゾーン全域にわたってバンドが存在しない。これは、この帯域に対応する周波数の光はフォトニック結晶中を伝播できないことを意味する。このような、伝播が禁止された周波数帯域をフォトニックバンドギャップと呼ぶ。例えば、外部からバンドギャップに相当する波長の光を結晶に入射すると全反射される。

【0014】バンドギャップを持つフォトニック結晶に点欠陥、つまり周期構造中の不均一要素が導入された場合を考える。欠陥部では周期構造が乱れているので図3のバンド図は適用されず、バンドギャップ波長の光でも存在できる。しかし、欠陥の周囲は完全なフォトニック結晶なので、光は外部へ伝播できず欠陥内部に反射されることになる。図4は、このときの様子を概念的に示したものであるが、点欠陥とその周囲のフォトニック結晶は微小共振器を形成し、その内部で、光は多重反射を起こし、閉じ込められた状態となり、定常状態を形成する。このフォトニック結晶欠陥内での光の定常状態を、欠陥順位と呼ぶ。

【0015】欠陥が微小共振器として作用するためには、周りのフォトニック結晶で全反射されることが必要なので、欠陥単位は必ずバンドギャップに対応する周波数に存在する。欠陥の具体的形状としては、 ϵ_2 の円柱(あるいは孔)の径を変化させる形状が一般的である。図4に示される欠陥は、一つの円柱の径を0とみなすことができるが、径を大きくしても欠陥順位は形成される。いずれにしろ、フォトニック結晶の形成技術さえあれば、微小共振器の作成には特段のプロセス技術を必要とせず、同一平面上に複数の微小共振器を作製することも可能である。

【0016】以上説明したように、フォトニック結晶の欠陥を用いれば、単純な構造の微小共振器を比較的簡便に、また密度や位置に関して任意に作製できる。このような特徴は、以下に説明する結合微小共振器導波路の作製に極めて好適である。

【0017】結合微小共振器導波路の特性に関しては、例えば、「オプティクス・レターズ(Optics Letters)、第24巻、711頁」に示されている。図5は、その光の伝播の様子を模式的にあらわしたものである。図に示されるように、結合微小共振器導波路とは、共鳴周波数(即ち、局在モードの周波数) Ω の微小共振器を、一定の間隔 Λ で連ねて配置した構造である。通常、微小共振器の中では光は内部反射を繰り返し、定在波を形成する。理想的な微小共振器が孤立して存在する場合、光子は内部に完全に閉じ込められ外部に出ることはない。

【0018】しかし、適当な距離で他の共振器がある場

合、微小共振器Iに閉じ込められた光の空間分布と微小共振器IIの光の空間分布に重なりが生じるため、二つの共振器の間でエネルギーの伝播が可能となる。このように、共振器間でエネルギーのやり取りがある場合を指して、「二つの共振器は結合している」という。

【0019】図5に示すように、隣り合った二つが互いに結合した状態で多数の共振器を並べると、前記のエネルギー伝播が連続的に繰り返され、入射パルスは微小

$$\omega = \Omega (1 + \kappa \cos(k\Lambda)) \quad \dots\dots\dots (1)$$

という関係が成り立つ。ここで、 κ は共振器同士の相互作用の強さに関わる量で、共振器の構造、共振器間の距離などによって決定される定数である。 k は結合共振器導波路中の光の波数ベクトルである。(1)式にあらわされるように、 ω は、 Ω の $(1 \pm \kappa)$ 倍の範囲の値をと

$$\begin{aligned} Vg &= d\omega/dk = -\kappa\Lambda\Omega \sin(k\Lambda) \\ &= \Lambda\Omega(\kappa^2 - (\omega/\Omega - 1)^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

(2)式から、群速度の絶対値は、 $\omega = \Omega$ のとき最大値 $\kappa\Lambda\Omega$ をとり、 $\omega = (1 \pm \kappa)\Omega$ のとき最小値の0をとることがわかる。一般に、波長分散Dは、次の式で定義

$$D = d(1/Vg)/d\lambda \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式より、分散は群速度の逆数 $1/Vg$ の波長変化に対する傾きであることがわかる。群速度の絶対値の逆数 $1/Vg$ を関数とした場合の様子を、図6に示す。 λ_0 は、 $\omega = \Omega$ のときの光の波長である。 λ_1 、 λ_2 は、 $\omega = (1 \pm \kappa)\Omega$ のときの光の波長である。図示されるように、 $1/Vg$ は、 λ_1 、 λ_2 で無限大となり、 λ_0 で最小値 $1/\kappa\Lambda\Omega$ となる、下に凸の形状をしている。

【0024】図6のグラフに示されるように、 $1/Vg$ の傾きは、マイナス無限大から0を経てプラス無限大まで、連続的に変化する。従って、これを分散補償器に応用した場合、第一に非常に大きな分散が得られ、第二に符号の正負も含めて必要な分散量を任意に選ぶことができる、という特徴を有する。

【0025】また、伝播に伴う損失は原理的に発生せず、実際上も、光は狭い領域に強く閉じこめられた状態で伝播するので、散乱等による損失は極めて小さいことが予測される。更に、微小共振器それ自体に光が強く閉じ込められているため、改めて導波路構造を形成する必要がなく、簡便なプロセスで作製が可能となる。

【0026】本発明は、以上説明したフォトニック結晶中の欠陥を伝播する光の分散特性を利用し、光パルス伝送路で生じた波長分散を補償する波長分散補償器である。本発明による波長分散補償器は、このように波長分散量が大きく、極めて小さなサイズで必要な分散補償量が得られる。例えば、駆動装置等を除いた構成で、従来のものと比べて、数百分の1以下の小型化が可能である。また、低損失で、光の閉じ込めの構造を設ける必要がなく、作製プロセスも通常の半導体プロセス技術を用いて容易に可能であるという利点がある。

共振器列中を次々に伝播していくことになる。これが、結合微小共振器導波路の原理である。

【0020】結合微小共振器導波路中の光の伝播特性は、光が共振器に強く束縛され、隣の共振器とのみ相互作用するという、「固い結合の近似」(Tight Binding Approximation)でよく説明される。個々の共振器の共鳴角周波数を Ω 、結合共振器導波路を伝播する光の角周波数を ω とすると、「固い結合の近似」のもとでは、

ることがわかる。

【0021】結合微小共振器を伝播する光の群速度Vgは、次の(2)式で表される。

【0022】

される。

【0023】

【0027】

【発明の実施の形態】(実施例1)図1は、本願発明による可変分散補償器の第1の実施例を示す図である。図1(a)は、本発明による可変分散補償器の概観図を示す。図に示すように、本実施例は、互いに異なる分散補償量の導波路を複数個設置した導波路アレイ1と、導波路アレイ1を駆動する為の駆動装置2と、光信号の入出力のための入力側ファイバー3および出力側ファイバー4とから構成される。導波路アレイ1上には分散補償導波路5がn本配置されている。図中、5nは、n番目の分散補償導波路を示す。

【0028】図1(b)に、分散補償導波路5の構造を模式的に拡大して示す。分散補償導波路5は、通常導波路6と分散補償を担うフォトニック結晶欠陥導波路7が直列に繋がれて構成される。図に、フォトニック結晶欠陥導波路7の長さをx、通常導波路6の長さをy1、y2と示されている。n本の分散補償導波路は、x+y1+y2の長さは同じであるが、xの長さは一本一本異なり、従って、分散補償量が異なる。導波路アレイ1の中から、所望の分散量に応じた分散補償導波路5を、駆動装置2を含む駆動系によって入力側光学系と出力側光学系の間に挿入して、光学経路を成立させるという構成である。

【0029】図1(c)は、図1(b)のPP'断面の断面図である。Si基板10に、SiO₂層9、Si層8が順次積層され、Si層8には欠陥付二次元フォトニック結晶がパターンニングされている。SiO₂層9の層厚は3μm、Si層8の層厚は0.5μmである。フォトニック結晶の欠陥部以外の構造は、図2に示すものと同じ円孔三角格子配列で、格子間隔aは0.600μm

と $0.608\mu\text{m}$ の二種類を用いた。円孔の半径 r は、いずれの場合も $0.27\mu\text{m}$ とした。

【0030】欠陥の周期、構造は、図1(b)に図示するとおりである。欠陥付二次元フォトニック結晶層のSiの充填率は約27%で、平均屈折率は1.675である。欠陥付きフォトニック結晶層は、屈折率1.5の SiO_2 層9と、屈折率が1の空気に挟まれ、スラブ構造のコアとなる。また、フォトニック結晶欠陥付導波路7の両端に接続される通常導波路6として、本実施例ではSiリッジ導波路を用いた。リッジ高さはフォトニック結晶部分と同じ $0.5\mu\text{m}$ 、導波路幅は $0.5\mu\text{m}$ とした。

【0031】次に、フォトニック結晶欠陥導波路の製造方法を、図7(a)から図7(f)を参照して説明する。基板には、SOI (Silicon on insulator: Si/ SiO_2 /Siの積層構造) 基板14を用いた。SOI基板14は、下地Si層13、厚さ $3\mu\text{m}$ の SiO_2 層12、厚さ $0.5\mu\text{m}$ のSi層11から成る。まず、図7(b)に図示するように、基板14に膜厚 $0.3\mu\text{m}$ の SiO_2 層15を熱CVDによってデポジションした。次に、図7(c)に示すように、電子線リソグラフィによって SiO_2 層15上に、欠陥部分(不均一要素)17を含むレジストパターン16を形成する。

【0032】このレジストパターンをマスクとして、図7(d)に示すように、RIE (Reactive Ion Etching) を用いて SiO_2 層15をエッチングした。酸素アシッシングによってレジストパターン16を除去した後、図7(e)に示すように、パターンが転写された SiO_2 層15をマスクとしてSi層11をECR (Electron Cyclotron Resonance) でエッチングした。このとき、Si層11を完全にエッチングしてしまわずに、エッチング保護層として $0.05\mu\text{m}$ 程度のSi層18を残した。最後にフッ化水素系エッチング液で SiO_2 層15を除去して、図7(f)に示す構造とした。図1(b)に示した前後の通常導波路も一連のプロセスで同時に作製される。

【0033】以上のように、本発明におけるフォトニック結晶欠陥導波路は、通常の半導体プロセス技術を用いて作製することが可能である。

【0034】次に、本波長分散補償器の $1.55\mu\text{m}$ 付近の入射光に対する分散補償能力を説明する。先述のように、分散量は、式(2)、(3)で与えられる。したがって、共振器の共鳴周波数 Ω 、欠陥の間隔 Λ 、係数 κ 、を元に分散量が算出できる。

【0035】図8は、上記二次元フォトニック結晶において、一つの円孔の径を変化させた場合の欠陥準位を示す図である。縦軸が規格化周波数、横軸が変化させた円孔の半径 r_d を示す。本実施例では、欠陥は円孔一つを完全に取った構造としているので、図8中の $r_d=0$ に相当する。このとき対応する規格化周波数($\Omega a/$

$2\pi c$)は、 0.39 である。即ち、フォトニック結晶とその欠陥の作る微小共振器の共鳴周波数は $\Omega=0.39\times 2\pi c/a$ で与えられる。 Λ は $2a\sqrt{3}$ となる。 κ の値は、測定した群速度を計算式にフィッティングすることによって決定した。本構造では、 $\kappa=-0.03$ であった。

【0036】このように、フォトニック結晶の欠陥部分を、図4に示すような円孔を完全に取り去った構造とすることなく、円孔の径を変えることによっても波長分散量を制御できることがわかる。

【0037】このようにして得られた分散補償能力を図9に示す。縦軸は素子 1mm あたりの分散量(D)、横軸は波長(λ)を示している。 $1.55\mu\text{m}$ の波長に対して、 $a=0.600\mu\text{m}$ の場合が -20ps/nm/mm 、 $a=0.608\mu\text{m}$ の場合が $+20\text{ps/nm/mm}$ の分散補償能力を持つ。

【0038】本実施例の可変分散補償器では、 $x+y_1+y_2$ を 10mm で固定し、 x は -20ps/nm/mm 、 $+20\text{ps/nm/mm}$ のそれぞれの導波路に対し 1mm から 1mm ステップで 8mm までとした。これに通常導波路のみで構成した導波路(つまり、分散が実質的に 0ps/nm/mm とみなせる導波路)を加えて、計17本の導波路をアレイ上に設置した。従って、本可変分散補償器の可変幅は -160ps/nm から $+160\text{ps/nm}$ 、分解能は 20ps/nm である。

【0039】本実施例では、実施例4で後述する光伝送システムに好適なように可変幅、分解能を設計したが、アレイに含む導波路の数、導波路の長さや、フォトニック結晶の構造等のパラメータを変えることにより、所望の仕様のものが作製できることは言うまでもない。

【0040】また、本実施例では、分散補償導波路アレイ1上に複数の分散補償導波路5を設けて可変構造としたが、あらかじめ必要な分散量に最適化設計した分散補償導波路を一本のみ用いた場合でも、従来技術と比較して劇的に小型化された分散補償器を提供することが出来、大きな効果が得られる。

【0041】(実施例2) 図10は、本発明による可変分散補償器の第2の実施例を示す。本実施例は、入力側に $1\times n$ の空間光スイッチ20、スイッチングを制御する制御装置22、分散補償導波路アレイ1、出力側の $n\times 1$ の光カップラ21から構成される。個々の分散補償導波路の具体的な構成は実施例1と同様である。本実施例では、光スイッチによって光学経路を切り替えることで、所望の分散量を持つ分散補償導波路5を選択する。

【0042】(実施例3) 実施例1及び2では、分散補償部の長さを変化させて異なる分散量の導波路アレイを構成した。導波路毎に分散補償量を変化させる他の方法を例示する。

【0043】図11は、本発明の第3の実施例を示し、欠陥付きフォトニック結晶導波路7のフォトニック結晶

の格子定数 a が、導波路毎に異なる導波路アレイの様子を示したものである。格子定数 a が異なると、個々の微小共振器の共振周波数、即ち(2)式中の Ω が変わる。従って、孔の大きさが異なるフォトニック結晶欠陥導波路では同じ波長の光に対して分散が異なる。

【0044】図12は、格子定数を変化させた場合の分散の変化の様子を示したものである。縦軸は分散量(D)、横軸は格子定数(a)を示す。この方法を用いた場合、分散補償導波路中の欠陥付きフォトニック結晶導波路の長さ x を一定に保ったまま分散補償量を変化させることができる。

【0045】(実施例4) 実施例1乃至3では、分散量の定まった複数の導波路を用意し、導波路を切り替えることで分散量を変化させていた。以下に、一本の導波路で連続的に分散量を変化させる方法を例示する。

【0046】図16は、本発明の第4の実施例であり、電圧印加により分散量が可変な欠陥付きフォトニック結晶導波路の概観図と断面図を示したものである。図16(a)に図示するように、本実施例では、分散補償導波路がフォトニック結晶欠陥導波路と正電極105、負電極106とから構成される。図16(b)は、図16(a)のAA'断面図である。SiO₂層108上に電気光学定数の大きな誘電体であるLiNbO₃層107が順次積層され、欠陥付き二次元フォトニック結晶がパターンニングされている。LiNbO₃の屈折率はSiO₂よりも大きいので、空気とSiO₂をクラッドとするスラブ構造のコア層として働く。

【0047】次に、分散量を変化させる原理を説明する。正電極105と負電極106間に電圧を印加すると、図16(b)に示すような電界がかかり、LiNbO₃層107の屈折率が変化する。この屈折率の変化により、結合した欠陥を伝わる光の特性に変化が生じる。図17は、電圧印加時の $1/Vg$ の波長依存性カーブの変化を模式的に示したものである。電圧印加によって曲線全体がシフトし(矢印→で示す)、信号光の使用波長での $1/Vg$ の傾き、即ち分散量に変化することがわかる。屈折率の変化量は電界によって決定されるから、分散量は印加電圧で制御される。

【0048】以上説明したように、本実施例の分散補償導波路は、電圧印加によってその分散量を連続的に変化することが可能である。本実施例では、LiNbO₃を用いたが、電気光学効果の大きい他の非線形光学材料や、半導体、ポリマー等を用いても同様の効果が得られるのはいうまでもない。

【0049】(実施例5) 図18は、本発明の第5の実施例であり、分散補償導波路をファイバグレーティングを用いて構成した例の概念図を示す。通常ファイバグレーティングとは、コアの屈折率が周期的に変調されている光ファイバーで、これは1次元のフォトニック結晶とみなすことができる。

【0050】図18に示すように、本実施例では、屈折率 ϵ_c の光ファイバーのコア101に周期 t で屈折率 $\epsilon_g(>\epsilon_c)$ の高屈折率部102が設けられ、更に周期 t の整数倍の周期 T で欠陥103が設けられて、欠陥付きファイバグレーティング104が構成されている。104は、1次元フォトニック結晶中の欠陥導波路の一つの構成例である。本実施例では、欠陥103の屈折率は、 ϵ_c と等しく設定したが、他の屈折率にすることも可能である。本実施例での欠陥付きファイバグレーティングの作成方法は、通常ファイバグレーティングの作成方法で充分適用可能である。

【0051】(実施例6) 次に、本発明による可変分散補償器を適用した光伝送システムについて説明する。

【0052】図13は、本発明の第6の実施例であり、実施例1に例示した可変分散補償器を用いた40Gbps/チャンネルの波長分割多重光伝送システムを示す。このシステムは送信装置30、伝送ファイバ一路31、受信装置32から構成される。送信装置30は、各波長(チャンネル)ごとの電気-光変換器(E/O)33、波長多重器34、光送信増幅器35から構成されるが、これらは通例のものをもってして十分である。使用波長は1.55 μ mを中心とした帯域とする。伝送ファイバ一路31には分散シフトファイバーを用い、伝送距離は80kmである。

【0053】受信装置32は、光受信増幅器36、波長分離器37、実施例1に記載の本発明の可変分散補償器38、光-電気変換器(O/E)39から構成される。多重されて伝送された光パルスを波長分離装置37で各波長に分割し、可変分散補償器38で各々のチャンネルで最適な分散補償を行う。分散シフトファイバーの分散は、1.53~1.6 μ mで数ps/nm/km以下である。伝送距離80kmで、最大±200ps/nm程度の分散を受けるが、その値はチャンネル(波長)によって異なる。実施例1で詳細に説明したように、可変分散補償器38は可変幅±160ps/nm、分解能は20ps/nmであるから、全てのチャンネルに対して分散をほぼ補償することが可能である。

【0054】(実施例7) 次に、本発明による可変分散補償器を適用した光伝送システムの他の実施形態を説明する。

【0055】図14は、本発明の第7の実施例であり、本発明による可変分散補償器を用いた10Gbps/チャンネルの波長分割多重光伝送システムを示す。このシステムは、送信装置30、伝送ファイバ一路40、受信装置41から構成される。送信装置30の構成は実施形態4で例示したものと同様の構成である。伝送ファイバ一路40には1.3 μ m帯に最低分散領域を持つシングルモードファイバーを用い、伝送距離は80kmである。

【0056】即ち、本システムは、既設のシングルモー

ドファイバーを用いて波長分割多重方式により大容量伝送を行う際に用いるシステムである。受信装置41は、本発明の可変分散補償器42、光受信増幅器36、波長分離装置37、実施例1に記載した可変分散補償器42、光—電気変換器(O/E)39から構成される。

【0057】本システムでは、波長分離装置37の前段に可変分散補償器42を設置し、複数のチャンネルを一括して補償する。そのために、可変分散補償器42の設計パラメータは、実施例1とは異なる。具体的には、フォトニック結晶の格子定数 $a=0.585$ 、 $\kappa=0.1$ 、 $\Lambda=6a\sqrt{3}$ となる。このときの分散量(D)を、図15に示す。シングルモードファイバーと逆向きの分散スロープを示し、効果的な分散補償が可能である。

【0058】上述した、フォトニック結晶を用いた実施例では、フォトニック結晶の構造に、二次元の三角格子を用いた場合の例を主体に説明した。フォトニック結晶の構造は、一次元、二次元、三次元のさまざまな構造が提案されており、そのどれを用いても同様な効果を得られるのはいうまでもない。

【0059】

【発明の効果】以上述べたごとく、本発明によれば、超小型で、安価で、分散補償量が可変な波長分散補償器を得ることができる。更に、本発明の波長分散補償器を用いることにより、安価で、信頼性の高い光伝送システムを構築することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による可変分散補償器の第1の実施例を示し、(a)は可変分散補償器の概観図、(b)は分散補償導波路の拡大図、(c)は(b)のP-P'断面図。

【図2】二次元フォトニック結晶を示す図。

【図3】図2に示す二次元フォトニック結晶に対応するフォトニックバンド図。

【図4】フォトニック結晶中に設けられた欠陥中で光が局在モードを形成する様子を説明する概念図。

【図5】結合した微小共振器を光が伝播する様子を説明する概念図。

【図6】結合微小共振器導波路を伝播する光の $1/V_g$ を波長の関数として表した図。

【図7】本発明の第1の実施例を作製するプロセスを説明する工程図。

【図8】図2のフォトニック結晶に於いて、円孔の大きさを変化させたときに現れる欠陥準位を示すグラフ。

【図9】本発明の第1の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図。

【図10】本発明による可変分散補償器の第2の実施例の構成を示す図。

【図11】本発明の第3の実施例における分散補償導波路アレイの概念を示す模式図。

【図12】図11におけるフォトニック結晶欠陥導波路の、格子定数 a を変化させたときの分散量の変化を示す図。

【図13】本発明の第6の実施例を示し、可変分散補償器を用いた波長分割多重光伝送システムの構成を示す図。

【図14】本発明の第7の実施例を示し、可変分散補償器を用いた波長分割多重光伝送システムの他の構成を示す図。

【図15】図14の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図。

【図16】本発明の第4の実施例であり、連続可変分散補償導波路の構成を示す概観図(a)と断面図(b)。

【図17】図16の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図。

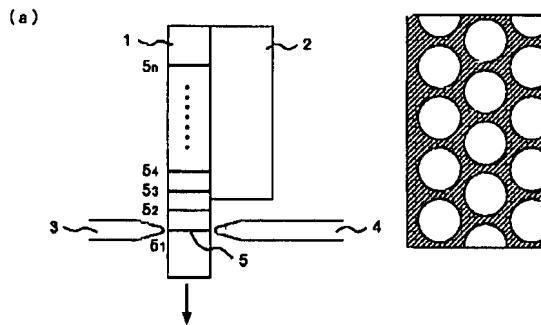
【図18】本発明の第5の実施例であり、ファイバージェーティングを用いた分散補償導波路を示す概念図。

【符号の説明】

1…分散補償導波路アレイ、2…駆動装置、3…入力側ファイバー、4…出力側ファイバー、5…分散補償導波路、6…通常導波路、7…フォトニック結晶欠陥導波路、8…Si層、9…SiO₂層、10…下地Si層、11…Si層、12…SiO₂層、13…下地Si層、電子線レジスト、14…SOI基板、15…SiO₂層、16…レジストパターン、17…欠陥部分、18…Si層、20…空間光スイッチ、21…光カップラ、22…スイッチング制御装置、30…送信装置、31…伝送ファイバー路、32…受信装置、33…電気—光変換器(E/O)、34…波長多重器、35…光送信増幅器、36…光受信増幅器、37…波長分離器、38…波長分散補償器、39…光—電気変換器(O/E)、40…伝送ファイバー路、41…受信装置、42…波長分散補償器、101…光ファイバーのコア、102…高屈折率部、103…欠陥、104…欠陥付きファイバージェーティング、105…正電極、106…負電極、107…LiNbO₃層、108…SiO₂層。

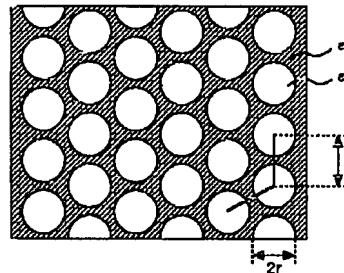
【図1】

図 1



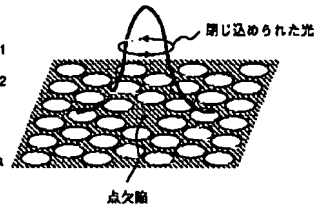
【図2】

図 2



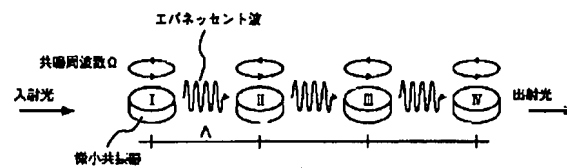
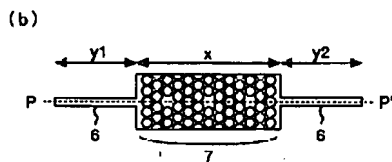
【図4】

図 4



【図5】

図 5



【図6】

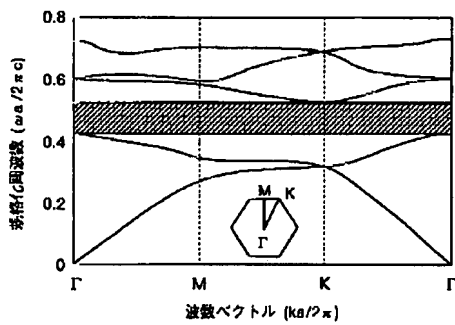
【図11】

図 6

図 11

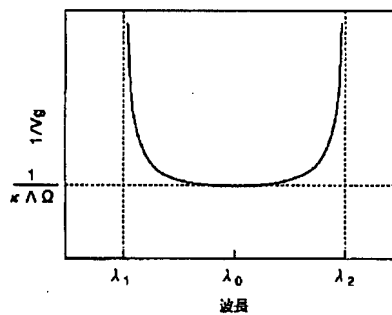
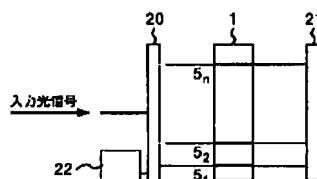
【図3】

図 3



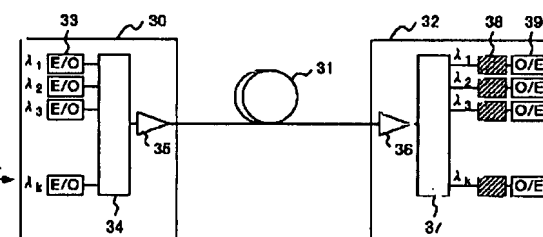
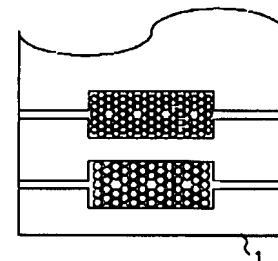
【図10】

図 10



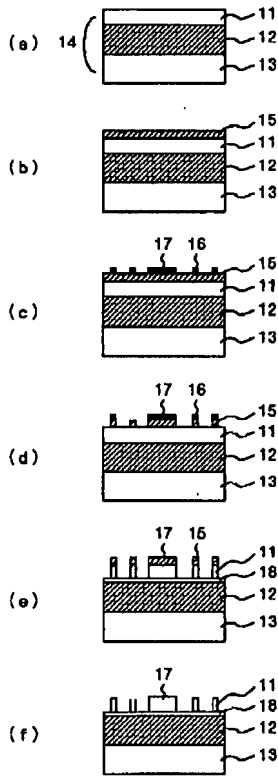
【図13】

図 13



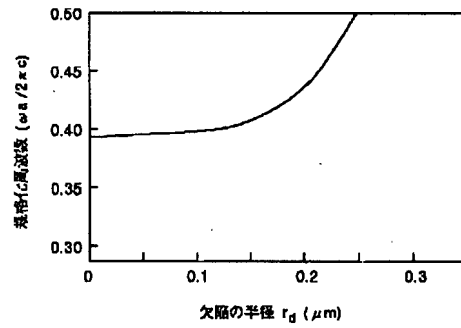
【図7】

図 7



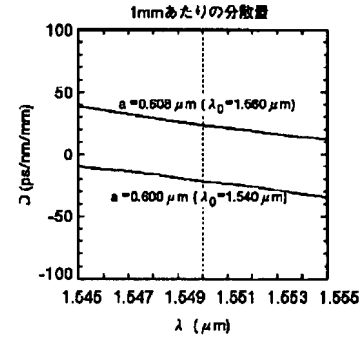
【図8】

図 8



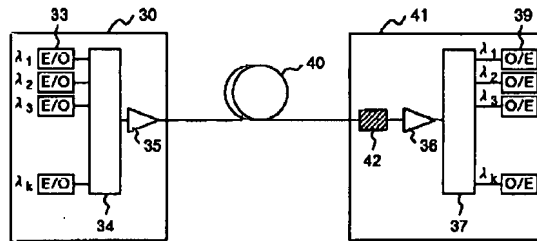
【図9】

図 9



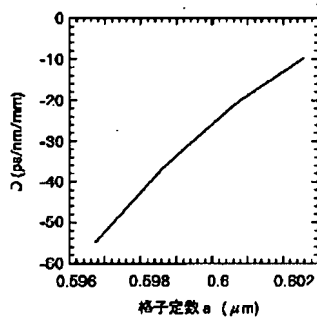
【図14】

図 14



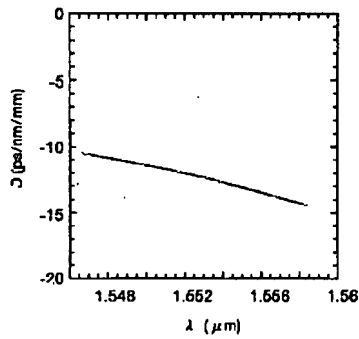
【図12】

図 12



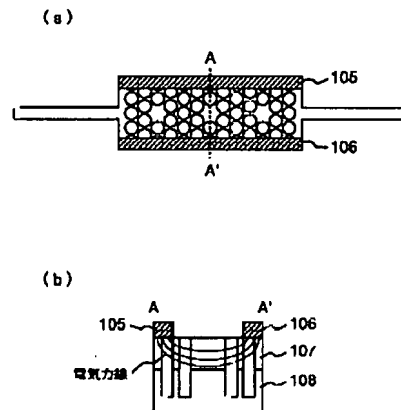
【図15】

図 15



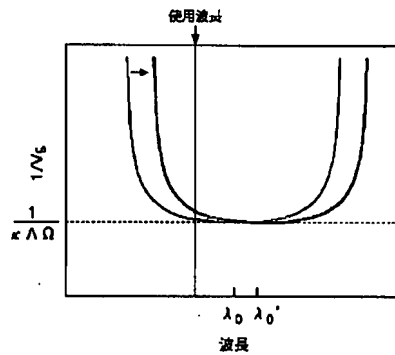
【図16】

図 16



【図17】

図 17



【図18】

図 18



フロントページの続き

(72)発明者 李 英根
埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会
社日立製作所基礎研究所内

(72)発明者 尾島 正啓
神奈川県横浜市戸塚区戸塚町216番地 株
式会社日立製作所通信事業部内
Fターム(参考) 2H047 KA03 LA18 MA05 RA00 TA01
TA14
5K002 CA01 DA02 FA02

JP2002243935

Title:
DISPERSION COMPENSATOR

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a dispersion compensator which is a transmission type, small in size and inexpensive, which has a large dispersion quantity to be compensated, and which can continuously vary the dispersion quantity by easy operation. **SOLUTION:** The compensator has a multilayered film structure of dielectric materials consisting of a first dielectric material region, a second dielectric material region and a thin film between these regions. The first dielectric material region is produced by alternately laminating first dielectric thin films having the thickness as about $1/4$ of the wavelength of the incident light in the first medium and second dielectric thin films each having the refractive index different from that of the first dielectric material and having the thickness as about $1/4$ wavelength of the incident light in the second medium. The second dielectric material region is produced by alternately laminating third dielectric thin films each having the thickness as about $1/4$ wavelength of the incident light in the third medium and fourth dielectric thin films each having the refractive index different from that of the third dielectric material and having the thickness as about $1/4$ wavelength of the incident light in the fourth medium. The thin film between the above regions is a fifth dielectric thin film having the thickness as about $1/2$ of the wavelength of the incident light in the fifth medium. In this structure, the dispersion value can be continuously varied by using such property that the dispersion almost linearly and continuously varies from positive to negative with respect to the wavelength in a high transmittance region formed almost in the center of the high reflection region.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-243935

(P2002-243935A)

(43) 公開日 平成14年8月28日 (2002.8.28)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 2 B 5/28

識別記号

F I

C 0 2 B 5/28

サーチコード* (参考)

2 H 0 4 8

審査請求 未請求 請求項の数16 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2001-37524(P2001-37524)

(22) 出願日 平成13年2月14日 (2001.2.14)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 山田 博仁

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(72) 発明者 栗林 亮介

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100080816

弁理士 加藤 朝道

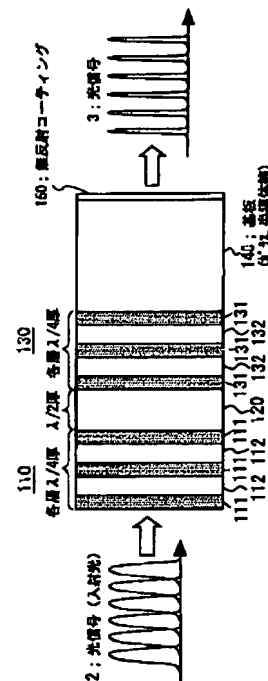
Fターム(参考) 2H048 GA07 GA13 GA45 GA57 GA62

(54) 【発明の名称】 分散補償器

(57) 【要約】

【課題】透過型でかつ小型、従って価格的にも安価であり、補償できる分散量の大きさも十分大きく、簡単な操作で分散量を連続的に可変できる分散補償器の提供。

【解決手段】膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第1の誘電体薄膜と、該第1の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第2の誘電体薄膜を交互に積層してなる第1の誘電体領域と、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第3の誘電体薄膜と、該第3の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第4の誘電体薄膜を交互に積層してなる第2の誘電体領域と、上記第1と第2の誘電体領域の間に挟まれ、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/2からなる第5の誘電体薄膜から成る誘電体多層膜構造において、高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域において分散の値が正から負に波長に対してほぼ直線的に連続的に変化することを利用し、分散の値を連続的に可変できる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第1の誘電体薄膜と、前記第1の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第2の誘電体薄膜とを交互に積層してなる第1の誘電体領域と、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第3の誘電体薄膜と、前記第3の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第4の誘電体薄膜とを交互に積層してなる第2の誘電体領域と、前記第1の誘電体領域と前記第2の誘電体領域との間に挟まれ、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/2からなる第5の誘電体薄膜と、を含む誘電体多層膜構造を有し、スペクトル上で高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域において、分散の値が正から負に波長に対してほぼ直線的に連続的に変化することを利用し、分散の値を連続的に可変としてなる、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項2】請求項1記載の分散補償器において、分散補償を行う入射光のスペクトル成分の80%以上が、前記高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域内に入る、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項3】請求項1又は請求項2記載の分散補償器において、入射光に対して、前記分散補償器を傾けることにより、前記入射光の波長に対して、前記分散補償器の透過中心波長を相対的に変化させ、前記入射光が、前記分散補償器を通過する間に受ける分散量を連続的に変化させる、ことを可能とする分散補償器。

【請求項4】請求項1又は請求項2記載の分散補償器において、前記分散補償器を構成する誘電体薄膜の多層膜の各膜の膜厚を、空間的に連続的に変化させることにより、空間的に異なる透過中心波長を有する構造とし、前記分散補償器上で、入射光を通過させる場所を変化させ、入射光の波長に対して前記分散補償器の透過中心波長を相対的に変化させ、入射光が前記分散補償器を通過する間に受ける分散量を連続的に変化させる、ことを可能とする分散補償器。

【請求項5】請求項1又は請求項2記載の分散補償器において、前記分散補償器の温度を変化させることにより、前記分散補償器を構成する材料の屈折率を変化させ、透過中心波長を変化させることにより分散量を制御する、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項6】請求項1乃至5のいずれか一記載の分散補償器において、前記分散補償器の誘電体多層膜構造がその上に形成され

ている基板、あるいは、前記誘電体多層膜の各層又ははいずれかの層を、励起により光増幅作用を有する光学活性な半導体材料で構成し、光励起あるいは電流注入等によるポンピングにより光増幅作用を行う、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項7】屈折率が異なる二種の誘電体薄膜を交互に配設してなる誘電体多層膜を、中間層となる誘電体薄膜の両側に備えてなる多層膜構造を有し、前記両側の誘電体多層膜のブラッグ反射の中心波長が一致しており、前記多層膜構造の一端から入射される光信号の波長と透過率及び分散特性との関係から、スペクトル上で高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域において、分散量の値は、波長に対して、一の符号から該一の符号とは逆の符号の値に、ほぼ線形、かつ連続的に変化しており、この波長領域の光信号に与える分散量の値を連続的に可変としてなる、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項8】膜厚が入射光の1波長分の光学膜厚の約1/4とされ、屈折率が相対的に高低の関係にある二種の誘電体薄膜が交互に配設されてなる第1、第2の誘電体多層膜を少なくとも備え、前記第1及び第2の誘電体多層膜の間には、膜厚が入射光の1波長の光学膜厚分の約 $(n+1/2)$ （ただし n は0又は所定の正整数）とされ、屈折率が相対的に低い中間層の誘電体薄膜が介挿されてなる多層膜構造を、基板上に備え、光信号が前記多層膜構造の一端に所定の入射角をもって入射され、前記多層膜構造を介し前記基板端面から光信号が出力され、

前記多層膜構造が与える分散量は、スペクトル上で高反射領域のほぼ中央に形成される透過領域の中心波長においてゼロとなり、前記中心波長に対して短波長側での負の分散量から長波長側での正の分散量まで波長に対してほぼ線形、かつ連続的に変化しており、前記波長領域の入射光に与える分散量の値を連続的に可変としてなる、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項9】前記基板端面が、無反射コートされている、ことを特徴とする請求項8記載の分散補償器。

【請求項10】前記多層膜構造の一端の入射光に対する角度が可変自在とされ、入射角を可変させることで、入射光が前記多層膜構造を通過する間に受ける分散量の値を連続的に変化させる、ことを特徴とする請求項7又は8記載の分散補償器。

【請求項11】前記多層膜構造の少なくとも一の誘電体薄膜の膜厚が、面内方向に空間分布を有する、ことを特徴とする請求項7又は8記載の分散補償器。

【請求項12】前記多層膜構造の誘電体薄膜の膜厚が、前記誘電体薄膜の一端と該一端と相対する他端とで異なる値に設定されており、前記基板上の前記多層膜構造の断面形状が一端で低く他端で高い形状とされている、ことを特徴とする請求項8記載の分散補償器。

【請求項13】請求項7又は8記載の分散補償器におい

て、前記多層膜構造の前記誘電体薄膜の屈折率を変化させるための手段として、前記分散補償器の温度を変化させる手段を備え、透過中心波長を変化させることにより、入射光が前記多層膜構造を通過する間に受ける分散量の値を連続的に変化させる、ことを特徴とする分散補償器。

【請求項14】前記多層膜構造がその上に形成される基板、又は、前記多層膜構造の少なくとも一の薄膜を、光学活性な半導体材料で構成し、前記基板端部から、光励起あるいは電流注入等によるポンピングにより光増幅された光信号が出力される、ことを特徴とする請求項7又は8記載の分散補償器。

【請求項15】請求項7乃至14のいずれかに記載の分散補償器を複数段直列に配設し、前記分散補償器は分散量が互いに異なるものとされ、非線型分散の補償を可能としたことを特徴とする分散補償器。

【請求項16】請求項7乃至14のいずれかに記載の分散補償器の前記多層膜構造を、発光素子の光出射面に備えてなる、ことを特徴とする分散補償器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は分散補償器に関し、特に正から負へと分散量を連続的に変化させることが可能なコンパクトでかつ安価な分散補償器に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、長距離・大容量光ファイバー通信において、伝送波形の歪を補正する分散補償は、極めて重要な技術課題となっている。分散補償の原理は、光ファイバー伝送中に受けた分散量：Dとは逆の符号の分散量：-Dを有する媒質中に、光パルス信号を導くことにより、信号波形の整形を行うものである。

【0003】現在、この分散補償には、分散補償光ファイバーや、光ファイバグレーティング、AWG (Arrayed Waveguide Grating) 分散補償器等が用いられている。しかしながら、これらは、いずれも、サイズが大きく、かつ高価であり、また分散補償量を連続的に変化させて調整することが困難であるか、もしくは不可能である等の問題があった。

【0004】また、小型のものとしては、GT干渉計のような反射型エタロンを利用して、補償するものもあるが、補正できる分散量が小さく、また反射型であるため、その使用方法には、各種制約があった。

【0005】これに対して、誘電体多層膜を透過型で用いることにより、分散補償を可能とする構造が、例えば特開平10-48567号（特許第2902996号）公報に提案されている。これは薄膜構造であるため、超小型、低価格、安定、かつ他の装置との整合性が良い等の各種利点を有している。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、従来の

誘電体多層膜を透過型で用いた分散補償器において、補償可能な分散量の値はほぼ固定であり、分散量の値を連続的に変えることは不可能であった。

【0007】したがって、本発明が解決しようとする課題は、誘電体多層膜構造による透過型で、小型で安価とされ、補償できる分散量の大きさも十分大きく、簡単な操作で分散量を連続的に可変できる分散補償器を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するための手段を提供する本発明は、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第1の誘電体薄膜と、該第1の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第2の誘電体薄膜を交互に積層してなる第1の誘電体領域と、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第3の誘電体薄膜と、該第3の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/4からなる第4の誘電体薄膜を交互に積層してなる第2の誘電体領域と、上記第1と第2の誘電体領域の間に挟まれ、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約1/2からなる第5の誘電体薄膜から成る誘電体多層膜構造において、スペクトル上で高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域において分散の値が正から負に波長に対してほぼ直線的に連続的に変化することを利用し、分散の値を連続的に可変できるようにしたものである。本発明は、さらに以下の構成としてもよい。

【0009】分散補償器において、分散補償を行う入射光のスペクトル成分の80%以上が、高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域内に入る。

【0010】分散補償器において、入射光に対して分散補償器を傾けることにより、入射光の波長に対して分散補償器の透過中心波長を相対的に変化させることにより、入射光が本分散補償器を通過する間に受ける分散量を連続的に変化させることを可能とする。

【0011】分散補償器において、分散補償器を構成する多層膜の各膜の膜厚を空間的に連続的に変化させることにより、空間的に異なる透過中心波長を有する構造とし、その分散補償器上で入射光を通過させる場所を変化させることにより入射光の波長に対して分散補償器の透過中心波長を相対的に変化させ、入射光が本分散補償器を通過する間に受ける分散量を連続的に変化させることを可能とする。

【0012】前記分散補償器において、分散補償器の温度を変化させることにより分散補償器を構成する材料の屈折率を変化させ、透過中心波長を変化させることにより分散量を制御する。

【0013】分散補償器において、分散補償器を構成する基板あるいは多層膜の各層或いは何れかの層を、励起により光増幅作用を有する光学活性な半導体材料とし、

光励起あるいは電流注入等によるポンピングにより光増幅作用を発揮できる。

【0014】

【発明の実施の形態】本発明の上記および他の目的、特徴および利点を明確にすべく、添付した図面を参照しながら本発明の実施の形態を以下に詳述する。

【0015】本発明は、誘電体多層膜構造からなる狭帯域透過型波長フィルターにおいて、高反射領域のほぼ中央に形成される狭帯域透過波長領域において、それを透過する光が受ける分散量が波長に対して正から負へとほぼ直線的かつ連続的に変化する領域が形成されることを利用し、その波長域の入射光に対して与える分散量を連続的に変化させることにより、任意の値の分散量の補償を行うものである。

【0016】本発明に係る分散補償器は、膜厚が入射させる光の媒質内での波長の約 $1/4$ からなる第1の誘電体薄膜(111)と、前記第1の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約 $1/4$ からなる第2の誘電体薄膜(112)とを交互に積層してなる第1の誘電体領域(第1の誘電体多層膜)(110)と、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約 $1/4$ からなる第3の誘電体薄膜(131)と、前記第3の誘電体とは屈折率が異なり、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約 $1/4$ からなる第4の誘電体薄膜(132)とを交互に積層してなる第2の誘電体領域(第2の誘電体多層膜)(130)と、前記第1の誘電体領域(110)と前記第2の誘電体領域(130)との間に挟まれ、かつ膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の約 $1/2$ からなる、第5の誘電体薄膜(120)と、を含む誘電体多層膜構造を有しており、スペクトル上で高反射領域のほぼ中央に形成される高透過率領域において、分散の値が正から負に、波長に対して、ほぼ直線的且つ連続的に変化することを利用し、該波長領域の入射光に対して与える分散量を連続的に変化させることにより、任意の値の分散量の補償を行うように構成されている。

【0017】

【実施例】上記した本発明の実施の形態についてさらに詳細に説明すべく、本発明の実施例について図面を参照して以下に説明する。図1は、本発明の一実施例の構成を示す図である。本発明の一実施例の分散補償器の基本構成は、図1に示すように、膜厚が入射させる光の媒質内での波長の $1/4$ からなる誘電体薄膜111と、誘電体薄膜111とは屈折率が異なり、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の $1/4$ からなる第2の誘電体薄膜112とを交互に積層してなる第1の誘電体領域(第1の誘電体多層膜)110と、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の $1/4$ からなる誘電体薄膜131と、誘電体薄膜131とは屈折率が異なり、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の $1/4$ からなる誘電体薄膜132

とを交互に積層してなる第2の誘電体領域(第2の誘電体多層膜)130と、第1の誘電体領域(第1の誘電体多層膜)110と第2の誘電体領域(第2の誘電体多層膜)130との間に挟まれ、膜厚が入射させる光のその媒質内での波長の $1/2$ (あるいは、 $n+1/2$ 、ただし n は正整数)からなる誘電体薄膜120とを含む誘電体多層膜構造を有する。

【0018】誘電体薄膜111、131は、高屈折率媒質(この例では、Siでその屈折率は約3.5)よりなりその光学膜厚は $\lambda c/4$ (ただし、 λc は分散補償を行う入射光の中心波長)、誘電体薄膜112、132は、低屈折率媒質(この例では、 SiO_2 で屈折率は約1.5)によりなりその光学膜厚は $\lambda c/4$ 、第1の誘電体領域110と第2の誘電体領域130の間の中間層をなす誘電体薄膜120は低屈折率媒質(SiO_2)よりなりその光学膜厚は $\lambda c/2$ である。ここで、光学膜厚とは、その媒質中での光の波長に対するサイズのことをいう。媒質の屈折率が n_r の場合、1波長分の光学膜厚とは、入射光の波長を λ とすると、 λ/n_r となる。

【0019】例えば、媒質が屈折率1.5のガラス(SiO_2)の場合、波長 λ が $1.5\mu\text{m}$ (マイクロメートル)の入射光に対する1波長分の光学膜厚 λ は、 $\lambda/n_r=1.5/1.5=1\mu\text{m}$ である。

【0020】光学膜厚 $\lambda/2$ は、その半分の厚さ、光学膜厚 $\lambda/4$ はさらにその半分の厚さである。

【0021】従って、図1に示した多層膜構造は、一般的な狭帯域透過型波長フィルターと同じ構造であり、本発明は、これを分散補償器として、利用している。

【0022】この場合、多層膜構造の中央に位置する光学膜厚 $\lambda c/2$ の誘電体薄膜120は、必ずしも、その光学膜厚は、 $\lambda c/2$ の厚さに限定されるものではなく、例えば、 $(n+1/2)\lambda c$ (n はゼロまたは自然数)の膜厚であってもよい。

【0023】図1に示した本発明の一実施例においては、多層膜構造は、誘電体薄膜(Si 111が3層、誘電体薄膜(SiO_2)112が2層、誘電体薄膜(Si)131が3層、誘電体薄膜(SiO_2)132が2層、誘電体薄膜(SiO_2)120が1層の計11層からなり、誘電体薄膜(SiO_2)120の両側の誘電体多層膜110、130は対称な構造とされているが、この中間の誘電体薄膜120を挟む両側の誘電体多層膜110、130の構造は、必ずしも対称である必要はない。すなわち、両側の誘電体多層膜110、130を構成する膜の材料は異なってもよいし、また誘電体多層膜110、130の層数は互いに異なってもよい。

【0024】本発明において、両側の誘電体多層膜110、130のブラッグ反射の中心波長が一致していればよい。つまり、各層の光学膜厚が $\lambda c/4$ となるようにすれば、任意の材料を用いてもよい。ただし、透明であることが好ましい。

【0025】図2は、図1に示した構成の本発明の一実施例の分散補償器の動作原理を示す図であり、図2(A)は、波長(横軸)と透過率(左縦軸)の関係(実線)、波長(横軸)と位相シフト量(右縦軸)の関係(破線)を示し、図2(B)は波長(横軸)と分散量(光パルスの群速度の波長依存性)(縦軸)の関係を示している。

【0026】図1に示した多層膜構造は、構造的には、通常の狭帯域透過型波長フィルターと同じであるため、図2(A)に示すように、透過中心波長 λ_c において、透過率は最大(媒質による吸収が無ければ理論的には100%)となる。

【0027】この波長領域を通過する光に対して、本発明の一実施例に係る多層膜構造が与える分散量は、図2(B)に示すように、透過領域の中心波長 λ_c においてはゼロとなるが、その短波長側で負の分散量から長波長側で正の分散量まで連続的な値をとり、波長に対して、ほぼ直線的(線形)に変化する波長範囲が存在する。

【0028】この分散量の最大値、および分散量の値が線形に変化する波長領域は、媒質の種類や多層膜の層数により任意に設計可能である。

【0029】補償できる分散量としては、例えば図1に示したように、Si/SiO₂全11層からなる分散補償器1枚で、最大±約0.2ps/nmであり、分散補償可能帯域としては、5nm程度となることが計算によって求められている。例えば、パルス幅約1.5ps(ピコ秒)、スペクトル幅約2.5nm(ナノメートル)の線形チャープ光パルスを、分散補償により、1.0psまで圧縮するためには、0.2ps/nmの分散量が必要であるが、上記した本発明の一実施例に係る分散補償器1枚で、これを実現することが出来る。

【0030】本発明の一実施例に係る分散補償器の多層膜構造において、補償可能な最大分散量は、多層膜を構成する材料の屈折率と多層膜の全層数によって決定される。すなわち、誘電体多層膜を構成する2種類の材料の屈折率差が大きければ大きいほど、また、多層膜の総数(全層数)が多ければ多いほど、補償できる最大分散量は大きくなる。

【0031】ただし、最大分散量を大きくすると、その分、補償可能な波長帯域は狭くなる。つまり、最大分散量と波長帯域とはトレードオフの関係にある。

【0032】図3は、図1に示した構成において、多層膜の全層数(横軸)と、得られる最大分散量(左縦軸;単位ps/nm)の関係(黒丸印)、分散補償可能な波長帯域(右縦軸;単位nm)の関係(黒四角)を示す図である。図3を参照すると、得られる最大分散量は、多層膜の層数が多くなるに従い大きくなるが、波長範囲は狭くなることが分かる。

【0033】従って、本発明の一実施例に係る分散補償器において、広帯域を求める場合、得られる最大分散量

は、ある程度犠牲になる。

【0034】両側の多層膜110、130の光学膜厚を少しずつ変化させ、ブラッグ反射の中心波長を、チャープさせることによって、広帯域化を図ることはできるが、この場合も、やはり得られる分散量は小さくなる。

【0035】本発明の一実施例に係る多層膜構造を形成するには、入射光に対して、透明な基板上に形成される。多層膜部分そのものは、10層積層しても10 μ m足らずの膜厚であり、このままでは、機械的強度を保てないからである。図1には、本発明の一実施例として、入射光に対して透明なガラスや半導体などの基板140(厚さは自由)上に積層した構造が示されている。この場合、基板140の多層膜と反対側の面(光の入出射面)には無反射コーティング150(反射防止膜)を施すことが好ましい。基板140の端面からの反射が残る状態で作製した場合には、光が、基板140の端面と多層膜との間で、多重反射を起すことにより、分散特性に悪い影響を与えることが計算により確認されている。

【0036】次に、図1に示した構成の分散補償器において、入射光に対して分散量を連続的に変化させる手法について説明する。分散量を連続的に変化させる手法の一例として、最も簡便で現実的な手法を説明する。

【0037】図4は、本発明の第2の実施例を説明するための図であり、分散量を連続的に変化させる原理を示す模式図である。

【0038】図4を参照すると、本発明の第2の実施例においては、入射光2に対して、図1に示した構成からなる分散補償器(分散補償フィルター)1の角度を傾けることにより、透過中心波長をずらすことが可能である。図1の誘電体多層膜110の端面(光入射面)に入射される光信号(入射光)2が、端面法線(入射角0)方向に対して、所定角となるように、分散補償器1の位置が設定される。

【0039】入射光に対して透過中心波長が相対的に変われば、透過中に入射光が受ける分散量も変化する。従って、入射角を可変に制御することにより、分散量の微調整が可能となる。

【0040】図1に示した多層膜構造においては、図4に示すように、入射角を20度回転させることにより、分散特性を、約20nm短波長側へシフトさせることが可能である。

【0041】図5は、本発明の第2の実施例の原理を説明するための計算結果をグラフとして示したものであり、入射角(横軸)と分散量(縦軸)の関係を示す図である。図5において、p(黒丸印)、s(黒四角)は、偏波の向きを表している。図5を参照すると、入射角に対して、分散量の値を制御できることが分かる。

【0042】分散量を連続的に変化させる別の手法についてさらに説明する。図6は、本発明の第3の実施例を説明するための図である。分散量を制御する別の方法と

しては、図6に示すように、分散補償器1（図1に示した基本構成からなる）を構成する多層膜（図1の111、112、120、131、132）の各膜の膜厚を、空間的に連続的に変化させることにより、空間的に異なる透過中心波長を有する構造とし、その分散補償器1上で、入射光を通過させる場所を、変化させることにより、入射光の波長に対して、分散補償器の透過中心波長を相対的に変化させ、入射光が、分散補償器を通過する間に受ける分散量を、連続的に変化させている。

【0043】多層膜の各膜の膜厚を、空間的に連続的に変化させることは、成膜装置をなす通常のスパッタ装置や真空蒸着装置において、1%程度の膜厚の空間分布が得られれば、容易に実現可能である。

【0044】なお、図6では、誘電体多層膜110、130、中間層の誘電体薄膜120の各薄膜の膜厚が、薄膜の一端と該一端と相対する他端とで異なる値に設定されており、基板140上の多層膜構造の断面形状が一端で低く他端で高い形状とされているが、本発明において、かかる膜厚の分布としては、かかる空間分布に限定されるものではない。

【0045】分散量を制御するその他の手法として、分散補償器を構成する材料の屈折率の温度依存性を利用する構成としてもよい。例えば、誘電体薄膜を構成する材料の屈折率が温度によって変化すれば、光学膜厚も変化するため、透過中心波長も変化する。すなわち、分散補償器の温度を制御することにより、分散量を制御できる。

【0046】以下に、比較例として、特許第2902996号公報（特願平8-204487号）に記載される誘電体多層膜構造による透過型分散補償器と、本発明に係る分散補償器との相違点について説明する。特許第2902996号公報（特願平8-204487号）の分散補償器も、本発明に係る分散補償器も、その用いる誘電体多層膜の基本構造は同じである。つまり、どちらも、公知となっている狭帯域透過型波長フィルターを用いる点は同じである。

【0047】しかしながら、特許第2902996号公報（特願平8-204487号）（比較例）の分散補償器が、図7（A）に示すように、高反射領域に隣接したスペクトル幅の広い透過領域を用いているのに対して、本発明に係る分散補償器は、反射領域のほぼ中央に位置するスペクトル幅の狭い透過領域を用いている。なお、図7は、特許第2902996号公報の図面の図9に基づくものであり、図7（B）は、高反射領域の長波長側に隣接する透過領域における2次位相分散の計算結果である。

【0048】比較例の分散補償器では、分散補償を行う波長帯域をある程度広く取るために、図7（A）に示すように、高反射領域の両側に形成される広帯域の透過領域を用いる。この場合、ダウンチャープを補償する場合には、高反射領域の長波長側の透過領域を用い、アップチャープを補償する場合には、高反射領域の短波長側の

透過領域を用いるといった具合に、補償したい分散の符号（正、負）によって使用する波長域が異なってくる。

【0049】これに対して、本発明に係る分散補償器は、反射領域のほぼ中央に位置する透過領域を用いるために、正から負の任意のチャーピング量を、同一波長域で補償可能である。

【0050】本発明に係る分散補償器で、波長帯域を広くとりたければ、前述したように、多層膜の層数を少なくしてやればよい。ただしその分、得られる最大分散量は小さくなる。

【0051】従って、本発明に係る分散補償器では、分散補償を行いたい光信号のスペクトル成分を、この反射領域のほぼ中央に位置する透過領域に入れる必要がある。

【0052】計算上、光信号のパワースペクトル成分の80%以上がこの領域（反射領域のほぼ中央に位置する透過領域）内にあれば、分散補償は十分可能であることが分かっている。

【0053】次に、本発明の第4の実施例として、光増幅特性を有する分散補償器について説明する。図8は、本発明の第4の実施例を説明するための図であり、光増幅作用を有する分散補償器の構成を示す図である。図8を参照すると、本発明の第4の実施例においては、分散補償器の多層膜構造の基板140、または、誘電体多層膜110、130、あるいは中間層の誘電体薄膜120、あるいは何れかの膜を光学活性な材料とし、光励起あるいは電流注入によるポンピングにより光増幅作用を持たせることにより、光増幅作用を有する分散補償器を実現したものであり、光増幅された出力光3が得られる。

【0054】光学活性な材料としては、GaAsやAlGaAs系材料、InPやInGaAsP系の半導体材料などが一般的であるが、希土類をドーブしたガラスやポリマー等の高分子化合物も利用できる。

【0055】これらの材料に光増幅作用を持たせるには、半導体材料であれば、光励起やP-N接合を形成することによる、電流注入が用いられる。また、希土類をドーブガラスやポリマーの場合には、光励起が好ましい。

【0056】半導体材料で構成される電流注入型の構造としては、既に広く知られている面発光レーザの構造が適用できる。ただし、面発光レーザの構造と異なる点は、中央の層（面発光レーザでは活性層に相当）の厚さを、正確に、 $(n+1/2)\lambda_c$ （ n はゼロまたは自然数）に設定する必要があるということである。通常、面発光レーザでは活性層の厚さは任意である。

【0057】本発明のさらに別の実施例においては、分散量の異なる分散補償器を複数段直列に配設することにより、線形分散に加え、非線形分散（高次分散）の補償も可能となる。

【0058】さらには、本発明のさらに別の実施例とし

て、分散補償器を、レーザーなどの発光素子の光出射面へ直接形成することにより、レーザー共振器内部におけるチャージングを補償した形で光出力を得ることも可能である。

【0059】なお、本発明は、上記各実施例に限定されるものでなく、特許請求の範囲の各請求項の発明の範囲内において、当業者であればなし得るであろう、各種変形、修正を含む、ことは勿論である。

【0060】

【発明の効果】以上に説明したように、本発明によれば、誘電体多層膜構造からなる狭帯域透過型波長フィルタにおいて、高反射領域のほぼ中央に形成される透過領域を用いて、分散補償を行うことで、正から負へと分散量の連続的な変化が可能とされ、コンパクトで安価な分散補償器を実現することができる、という効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一の実施例の構成を示す図である。

【図2】本発明の一の実施例の原理を説明するための図

である。

【図3】本発明の一の実施例の原理を説明するための図である。

【図4】本発明の第2の実施例の構成を示す図である。

【図5】本発明の第2の実施例の原理を示す図である。

【図6】本発明の第3の実施例の構成を示す図である。

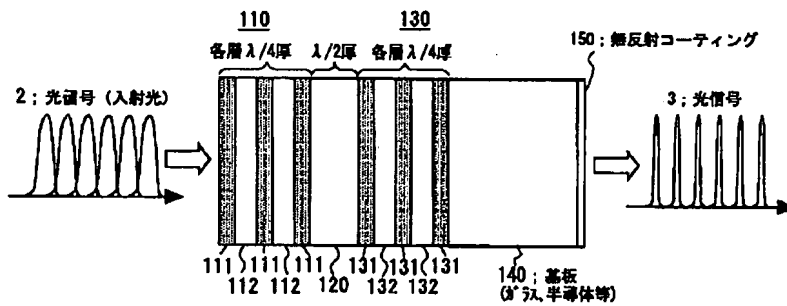
【図7】本発明と比較例との相違点を説明するための図である。

【図8】本発明の第4の実施例を説明するための図である。

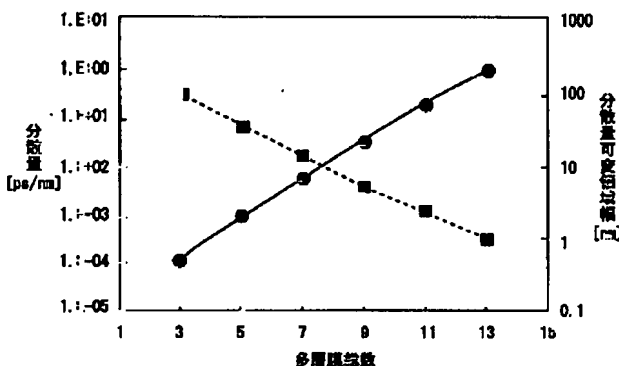
【符号の説明】

- 1 分散補償器
- 2 光信号（入射光）
- 3 光信号（出力光）
- 110、130 誘電体領域（誘電体多層膜）
- 111、112、120、131、132 誘電体薄膜
- 120 誘電体薄膜（中間層）
- 140 基板
- 150 無反射コーティング

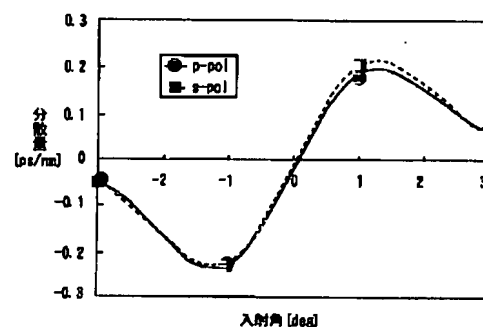
【図1】



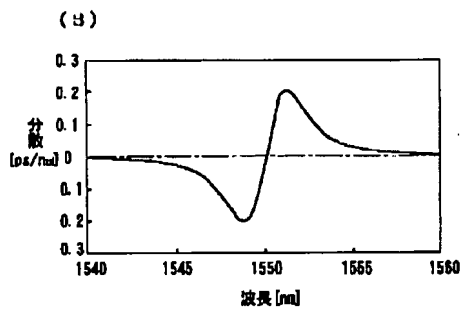
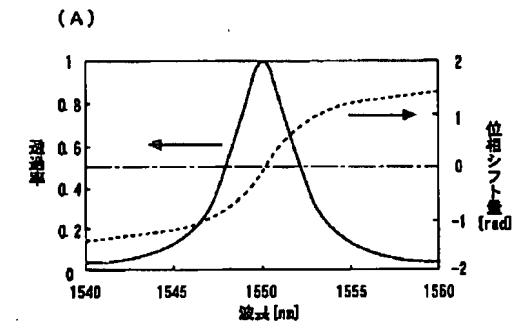
【図3】



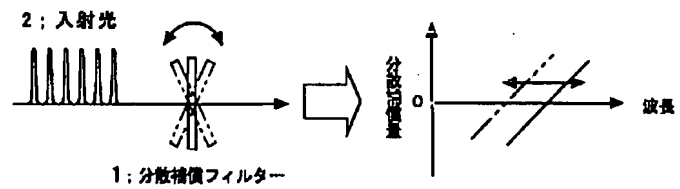
【図5】



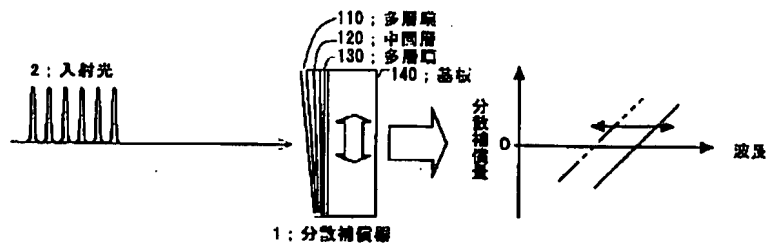
【図2】



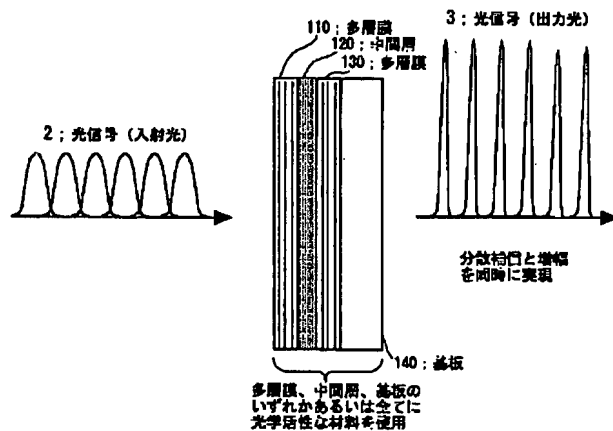
【図4】



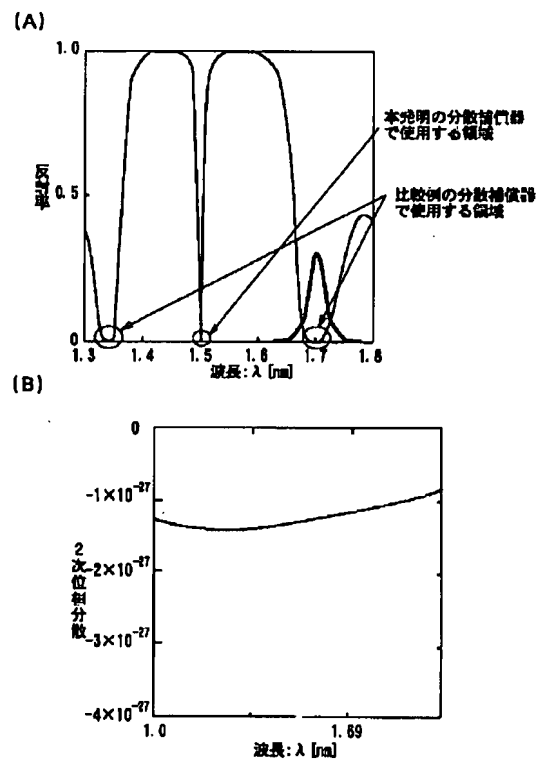
【図6】



【図8】



【図7】



JP2002303836

Title:

OPTICAL SWITCH WITH PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURE

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical switch which has a photonic crystal structure. **SOLUTION:** This optical switch has a slab type optical waveguide, the core 35 of which has a two-dimensional photonic crystal structure wherein ≥ 2 kinds of media 33 and 34 having different refractive indexes are arrayed regularly and cyclically in two dimensions. The photonic crystal structure has a linear defective waveguide on a straight line and a means which varies the refractive index of the linear defective waveguide.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-303836

(P2002-303836A)

(43) 公開日 平成14年10月18日 (2002. 10. 18)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	サーチコード* (参考)
G 0 2 F 1/01		G 0 2 F 1/01	F 2 H 0 4 7 A 2 H 0 7 9 C 2 K 0 0 2
G 0 2 B 6/12		1/015	5 0 5
G 0 2 F 1/015	5 0 5	1/313	

審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 11 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-106318(P2001-106318)

(22) 出願日 平成13年4月4日 (2001. 4. 4)

(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願 (科学技術庁平成12年度科学技術振興調整費による委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 白根 昌之

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(72) 発明者 徳島 正敏

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100080816

弁理士 加藤 朝道

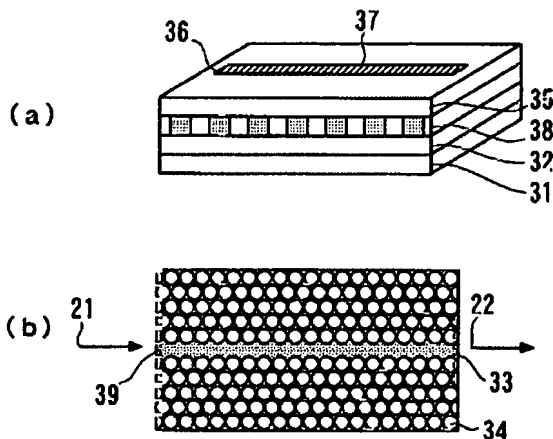
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶構造を有する光スイッチ

(57) 【要約】

【課題】フォトニック結晶構造を有する光スイッチを提供する。

【解決手段】スラブ型光導波路を有し、前記スラブ光導波路のコア35が、屈折率の異なる2種類以上の媒質33、34を2次元周期的に規則正しく配列した2次元フォトニック結晶構造を有する光スイッチであって、前記フォトニック結晶構造は直線上の線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶構造が線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項2】前記屈折率を変化させる手段が、電流注入における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項3】前記屈折率を変化させる手段が、電圧印加における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項4】前記屈折率を変化させる手段が、制御光の照射における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項5】前記フォトニック結晶構造において、前記線欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型干渉系が構成されており、2つの分岐された光路の一方または両方に導波路の屈折率を変調する手段を有する、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項6】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶構造は、入射光をフォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射することにより屈折させる手段と、

前記フォトニック結晶の屈折率を変化させる手段と、を有し、

前記屈折率の変化によって前記フォトニック結晶における屈折角を変化させる、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項7】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶への入射光自身の強度変化に応じて、前記フォトニック結晶の屈折率が変化し、スイッチング動作を行う、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項8】スラブ型フォトニック結晶の線欠陥導波路を用いた光スイッチにおいて、

前記スラブ型フォトニック結晶のコア層は、i型、n型、又はp型の半導体であり、

前記コア層の、前記線欠陥導波路を挟んで両側に、n型領域とp型領域を有し、

前記n型領域とp型領域に、それぞれn型オーミック電極またはp型オーミック電極が形成されている、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項9】前記コア層の母材の導電型が、n型又はp型であり、

前記コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極、及び、イオン注入領域が、前記線欠陥光導波路から離間して設置されている、ことを特徴とする請求項8記載の光スイッチ。

【請求項10】前記線欠陥光導波路が、前記フォトニック結晶構造において、屈折率の異なる2種類以上の媒質が周期的に規則正しく配列されていずに、同一媒質で少なくとも一列分置き換えられている領域が、光の入力端から出力端への伝搬経路に沿って延在されているものである、ことを特徴とする請求項1乃至9のいずれか一に記載の光スイッチ。

【請求項11】基板上に設けられた第1のクラッド層と、

前記第1のクラッド層の上に設けられ、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列されており、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有するコア層と、

前記コア層の上に設けられた第2のクラッド層と、を有し、

前記フォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が少なくとも一ライン分の幅で、光の入力端から出力端に向けて延在されている領域を有し、該領域が導波路をなしており、

電流注入、逆バイアス電圧の印加、あるいは入射光とは別の制御光の照射により、前記導波路の屈折率を変化させ、前記入力端に入射された光の前記出力端からの出力をオン及びオフする、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項12】基板上に設けられた第1のクラッド層と、

前記第1のクラッド層の上に設けられ、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有する、半導体よりなるコア層と、前記コア層の上に設けられた第2のクラッド層と、を有し、

前記コア層のフォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が、少なくとも一ライン分の幅で、光の入力端から出力端に向けて延在されている領域を有し、該領域が導波路をなし、

前記コア層において、前記導波路を挟んで両側に、n型領域とp型領域が配設されており、それぞれの領域に、n型オーミック電極又はp型オーミック電極が形成されており、

前記第2のクラッド層表面の第1、第2の電極が、前記

n型オーミック電極、及び前記p型オーミック電極にそれぞれ電氣的に接続されている、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項13】分岐型干渉計構成の光スイッチにおいて、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、

前記フォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が、少なくとも一ライン分の幅で延在されている領域を有し、該領域が導波路をなし、一本の前記導波路が、入力端から延在され第1のY分岐路によって2つの導波路に分岐されて延在され、第2のY分岐路によって合波されて一本の導波路として出力端にまで延在されており、

前記2つの導波路に対応して設けられた電極より電流注入、逆バイアス電圧の印加を行うか、あるいは制御光の照射により、前記2つの導波路間の光信号を同相とするか、位相差を生じさせることで、前記入力端に入射された光信号の前記出力端からの出力をオン及びオフする、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項14】屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、

外部導波路からの入射光は、前記フォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射され、前記フォトニック結晶中を伝搬する光は、前記フォトニック結晶の分散特性によって決定される一つのチャネル方向へ出力され、電流注入、逆バイアス電圧の印加、もしくは、入射光とは別の制御光の照射により、前記フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が変化し、それに応じて、屈折角が変化することで前記フォトニック結晶中を伝搬する光が別のチャネルへ出力される、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項15】屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、

前記フォトニック結晶は、2次元平面内において、光の伝搬方向に垂直な方向が所定幅の導波路となっており、前記導波路の光の伝搬方向に沿ってその両側にはクラッド層を備え、

入射光強度が小さい場合には光が前記導波路を伝搬して出射され、入射光強度がある程度強くなると、出射光の強度を制限するリミッター機能を有する、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項16】入射光強度が小さいときには透過光強度が小さく、入射光強度が大きくなると、透過光強度が増大するコントラスト増大機能を有する、ことを特徴とする請求項15記載の光スイッチ。

【請求項17】前記フォトニック結晶構造の周期構造が形成される2次元平面の表面と裏面側にクラッド層がそれぞれ設けられている、ことを特徴とする請求項13乃至15のいずれかに記載の光スイッチ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光スイッチに関し、特にフォトニック結晶構造を有する光スイッチに関する。

【0002】

【従来の技術】光通信においては、デジタル信号の0又は1に併せて光信号をオン・オフする仕組みが必要である。そのために最も単純な仕組みは光源に用いられる半導体レーザの出力そのものをオン・オフ制御する方法であるが、半導体レーザの出力を直接オン・オフする方法では、半導体レーザの発振安定性が悪くなることと、そもそも10Gbps（ギガビット／秒）以上の高速変調は困難である。

【0003】光信号をオン・オフするもう一つの方法として、光スイッチを用いる方法がある。これは、半導体レーザからの一定の光出力を後段に取り付けた装置によって変調してオン・オフする方法で、後段に取り付けられた装置は、光スイッチと呼ばれる。光スイッチを用いる場合、半導体レーザ光源の光強度は一定に保っておけるので、発振が不安定になる問題は解消される。また、半導体レーザ自体の変調速度には影響されない。

【0004】光スイッチは、従来、化合物半導体で構成され、動作原理として、

- ・多重量子井戸構造に電界を印加することによって実効的バンドギャップをレッドシフトさせる量子閉じ込めシュタルク効果を用いるもの、
- ・電流注入あるいは逆バイアス印加により活性層の屈折率変化を利用するもの、
- ・3次の非線形光学効果である光カー効果を利用するもの、

等が知られている。

【0005】この内、量子閉じこめシュタルク効果を用いるものは、井戸層とバリア層との組み合わせによりある程度の設計自由度を有するものの、バンドギャップ・エネルギーなどの材料固有の性質が選択できる材料では限られ、動作波長範囲の制約を受けるという問題点がある。

【0006】また、屈折率変化を利用するものは、利用できる屈折率変化が小さいため、オン・オフ時の信号光強度比を大きく確保するためには、数百ミクロン程度の長さが必要となり、高密度集積化の障害となっている。

【0007】光カー効果を利用する光スイッチは、高速化できる可能性が最も高い。しかしながら、光カー効果を起こすための高強度の制御光源が別途必要とされており、実用的ではない。

【0008】これらの問題点を解決できる可能性のある光スイッチとして、近年、フォトニック結晶を用いた光スイッチが提案されている。フォトニック結晶を用いた光スイッチに関する刊行物として、例えば特開平10-90638号公報には、複素屈折率の異なる2種類の光学媒質であって、少なくとも一方の光学媒質が半導体である2種類の光学媒質を含み、2次元平面上で周期構造を形成するフォトニックバンド構造と、前記2次元平面に平行な被制御光と、被制御光の光路と直交しない光路に沿って前記2次元平面上の周期構造に円偏光の制御光を照射する手段を有し、制御光によって被制御光の通過率をスイッチする光スイッチの構成が開示されている。

【0009】フォトニック結晶とは、屈折率の異なる2つ以上の媒質が光の波長オーダー、すなわちサブ μm 周期で3次元もしくは2次元周期的に規則正しく配列されたものであり、設計の自由度が大きく、特異な光学特性を有する人工光学結晶として注目を浴びている。

【0010】図1(a)に、このフォトニック結晶の構造の一例として、2次元フォトニック結晶を模式的に示す。これは、第1の媒質11に、2次元三角格子状に円柱形の第2の媒質12が埋め込まれた構造である。このようなフォトニック結晶においては、フォトニック結晶中に存在する光波に対して、エネルギーバンド構造を形成することが知られている。

【0011】図1(b)は、図1(a)の三角格子に対応する逆格子空間における第1ブリルアンゾーンである。正六角形の頂点がJ点、各辺の中点がX点、正六角形の中心が Γ 点となる。

【0012】図2の実線は、図1(a)のフォトニック結晶の、TM偏波に対する Γ -X方向のエネルギーバンド構造を計算した結果である。ここで、 a は格子ピッチ（又は格子定数）、 c は真空中での光速、 ω は光波の角振動数、 k は波数ベクトルの大きさを示している。また縦軸は規格化 $\Omega = \omega a / 2\pi c$ である。

【0013】図2のエネルギーバンド構造において、 Γ -X方向に進行する光に対してはエネルギーが $\Omega 1 \sim \Omega 2$ の範囲では光波モードが存在せず、「フォトニック・バンドギャップ(PBG)」と呼ばれる。

【0014】上記特開平10-90638号公報に開示されている光スイッチは、このPBGを、構成材料の屈折率の変化により制御させて、フォトニック結晶を伝搬する光をオン・オフさせるものである。即ち、この従来例では、エネルギー $\Omega 3$ の光は、PBG中であるために、光は伝搬できず、オフ状態であるが、外部からフォトニック結晶への制御光の照射、もしくは電流注入によ

って、フォトニック結晶を構成する材料の屈折率を変化させる。その結果、図2の実線のエネルギーバンド構造は、図2の点線で示すエネルギーバンド構造に変化し、 $\Omega 3$ の光に対して、伝搬モードが存在するようになってオン状態となる。逆に、エネルギー $\Omega 4$ の光波に対しては、屈折率変化によってオン状態からオフ状態に変化する。

【0015】上記特開平10-90638号公報に開示されている、フォトニック結晶を用いた光スイッチは、構成媒質の微小な屈折率の変化を利用しているが、被制御光の波長をエネルギーバンド端に設定することにより、光のオン・オフ効果を得ることができ、光スイッチとして機能する。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記の従来のフォトニック結晶を用いた光スイッチは、バルクとしてのフォトニック結晶自体が有している特性を利用したものであり、実際に光回路を形成するときに必要な光の導波、即ち、進行方向と垂直な方向における光の閉じ込めを全く考慮していないために、フォトニック結晶を伝搬してきた光の回収効率は、極めて低いものと思料される。

【0017】そこで、光を効率良く導波するために、フォトニック結晶を、基本伝搬モードの得られる $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 幅の導波路構造に細長く整形すると、図2に示すようなバルクのエネルギーバンドは崩れてしまい、このため、伝搬光のオン・オフ制御に必要なフォトニックバンドギャップが形成されなくなってしまう、という矛盾が生じる。

【0018】また、上記した従来の光スイッチは、全て1つのスイッチで1つのチャンネルのオン・オフを取り扱うため、マルチチャンネル化しようすると、必要なチャンネル数だけ光スイッチを用意する必要があった。

【0019】更に、従来の光スイッチは、全て、電流、電圧、光などの制御信号によって、信号光のオン・オフをしているため、制御信号の波形が劣化すると、信号光の波形も劣化してしまう、という問題がある。

【0020】したがって、本発明が解決しようとする課題の一つは、光を効率良く伝え、高速動作可能な、フォトニック結晶構造を有する光スイッチを提供することである。

【0021】また、後の説明からも明らかとされるように、本発明においては、1つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現すること、あるいは、信号がオンの時の信号光強度を描える波形整形機能を実現する光スイッチを提供することも、発明が解決しようとする課題としている。

【0022】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するための手段を提供する本発明は、スラブ型光導波路を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる２種類以上の物質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造を有する光スイッチであって、前記フォトニック結晶構造は線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する。ここで、スラブ型光導波路は、一層又は多層構造の平面の層状媒質で構成されており、面に沿った方向に光を伝搬する導波路をいう。本発明において、前記屈折率を変化させる手段は、電流注入であるか、あるいは、入射光とは別の制御光の照射よりなる。

【0023】また、本発明は、別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶構造は、線欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型干渉系が構成されており、２つの分岐された光路の一方または両方に導波路の屈折率を変調する手段を有する。

【0024】また、本発明は、さらに別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶は、入射光をフォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射することにより屈折させる手段と、フォトニック結晶の屈折率を変化させる手段とを有し、屈折率変化によってフォトニック結晶における屈折角を変化させる。本発明によれば、１つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現している。

【0025】また、本発明は、さらにまた別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶への入射光自身の強度変化に応じて、フォトニック結晶の屈折率が変化し、スイッチング動作をする。本発明によれば、信号がオンの時の信号光強度を描える波形整形機能を実現している。

【0026】また、本発明は、さらに別のアスペクト (aspect) において、スラブ型フォトニック結晶の線欠陥導波路を用いた光スイッチにおいて、前記スラブ型フォトニック結晶のコア層は i 型、n 型又は p 型の半導体であり、前記コア層の前記線欠陥導波路を挟んで両側に n 型領域と p 型領域があり、それぞれの領域に n 型オーミック電極と p 型オーミック電極が形成されている。

【0027】本発明において、コア層の母材の導電型が n 型又は p 型であり、前記コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極及びイオン注入領域が線欠陥光導波路から離れて設置されている。

【0028】

【発明の実施の形態】本発明の実施の形態について図面を参照して以下に説明する。図３は、本発明の第１の実施の形態の構成を示す図であり、図３（a）は、斜視図、図３（b）はフォトニック結晶層３８の平面図を示す。

す。

【0029】図３（a）を参照すると、n 型基板 31 上に n 型半導体クラッド層 32 を備えており、その上に異なる屈折率を有する i 型半導体（母体媒質）33 および 34 から構成されるフォトニック結晶層 38 が形成されている。

【0030】さらに、その上に p 型半導体クラッド層 35 を備えており、電流注入のための電極 36 およびリード線 37 が付加されている。なお、n 型基板 31 は、グランド電位に接地されている。

【0031】母体媒質である i 型半導体（母体媒質）33 中に、i 型半導体 34 からなる円柱が、２次元三角格子状に埋め込まれた形（周期構造を有する）であり、このうち i 型半導体 34 が、入射光 21 の入力端側から出力端側へ、直線上に、一列分だけ取り除かれており、母体媒質 33 に置き換えられている。以下、この領域 39 を、「線欠陥導波路」と呼ぶことにする。なお、円柱状の i 型半導体 34 は、空気、真空もしくは、絶縁体に置き換えてよい。

【0032】図３に示されるフォトニック結晶構造を有する光スイッチの作製法の具体例として、例えば次のような製法が用いられる。

【0033】n 型 InP からなる n 型基板 31 上に、有機金属化学気相法（MOCVD）あるいは分子線エピタキシー法（MBE）等によって、InGaAsP からなる n 型クラッド層 32 および InGaAsP からなる i 型半導体 33 を積層する。i 型半導体 33 は、0.3～0.5 μm 程度の膜厚とされている。

【0034】その後、i 型半導体 33 上に、２次元三角格子のマスクパターンを形成し、フォトニック結晶を実現するための円柱穴をエッチングにより形成する。

【0035】エッチング終了後、マスクを除去し、i 型 InP を成長すると、円柱穴が優先的に埋め戻され、i 型半導体 34 が形成される。

【0036】その後、さらに InP からなる p 型クラッド層 35 を積層し、電極 36 およびリード線 37 を付ける。

【0037】なお、エッチング終了時に、マスク除去後、あらかじめ InP からなる p 型クラッド層 35 を積層した基板を、InGaAsP からなる i 型半導体 33 に貼り付け、エッチングによって、p 型クラッド層 35 を残すという方法もある。この時、i 型半導体 34 は、空気となる。電極、リード線の付着方法は、前述したものと同一である。

【0038】次に、本発明の第１の実施の形態の動作原理について説明する。図４は、TM 偏波に対するエネルギーバンドを示す図である。以下、偏波は、TM のみに対して議論する。

【0039】線欠陥導波路以外のフォトニック結晶領域においては、電流注入等により屈折率変化を起こさない

場合には、図4の実線がエネルギーバンド構造となり、 $\Omega 5 \sim \Omega 6$ の光波は、2次元平面内では伝搬モードが存在しない。

【0040】従って、入射光21のエネルギーが $\Omega 5 \sim \Omega 6$ であれば、2次元平面内では導波路の外側、すなわち、フォトニック結晶領域には、光は伝搬できないために、上記線欠陥導波路に、強く閉じ込められる。例えば、エネルギーが $\Omega 7$ の光は、これに相当する。従って、格子ピッチの大きさであるサブ μm 程度の微小な導波路が実現可能となる。

【0041】2次元平面に垂直な方向に対しては、上下のクラッド層32、35の屈折率およびその層厚を、適切に選ぶことによって、コアであるフォトニック結晶層に、光が高効率に閉じ込めることができる。かかる構成により、本実施例の光スイッチにおいては、3次的に光を閉じこめることで、低損失で伝搬し、出射光22を得ることができる。

【0042】続いて、電流注入をした場合を説明する。フォトニック結晶層のキャリア数が変化することで（プラズマ効果により）、フォトニック結晶を構成するi型半導体33または34の少なくとも一方の屈折率が変化し、エネルギーバンドは、図4の点線のように変化する。この時、エネルギー $\Omega 7$ の光に対しては、フォトニックバンドギャップ（PBG）から外れてしまうため、線欠陥導波路の外側である完全なフォトニック結晶領域へと光が漏れ、線欠陥導波路を伝搬するうちに、その強度が減衰し、透過する出射光22の強度は、極めて弱いものとなる。

【0043】同じ原理に基づいて、入射光21のエネルギーが $\Omega 8$ の場合には、エネルギーが $\Omega 7$ の場合とは、逆に、電流注入により、出射光強度は、オフ状態からオン状態に変化する。

【0044】図5は、上記で説明した動作原理に基づいて、電流をオン／オフしたとき（電流投入の有無に応じた）の出射光強度を、タイミングチャートで示した図である。電極36を通して電流注入をした場合に、エネルギー $\Omega 7$ の出射光の強度（図5の出射光強度 $\Omega 7$ ）は、ゼロ、すなわち、オフ状態であり、電流注入をしない場合には、オン状態となっている。エネルギーが $\Omega 8$ の出射光の強度（図5の出射光強度 $\Omega 8$ ）は、出射光強度 $\Omega 7$ の場合とは、そのオン、オフが逆となっている。

【0045】ここでは、フォトニック結晶として、2次元三角格子を例にとったが、正方格子、正六角形格子等の他の2次元フォトニック結晶、あるいはダイヤモンド構造等の3次元フォトニック結晶であってもよい。

【0046】また、フォトニック結晶を構成する材料として、InGaAsPを挙げたが、その他の材料系でも構わない。さらに、屈折率を変化させる手段として、順バイアス印加による電流注入を挙げたが、逆バイアス印加による屈折率変化（フランツ・ケルディッシュ効果）

を利用しても同様の効果が得られる。

【0047】次に、本発明の第2の実施の形態について説明する。図11は、本発明の第2の実施の形態の構成を示す図である。図11を参照すると、フォトニック結晶の周期構造を有するコア層72が上下2つのクラッド層71、73に挟まれた構造が、基板70上に形成されている。

【0048】前記した第1の実施の形態と異なり、本発明の第2の実施の形態において、基板70の材料は任意とされており、クラッド層71、73は誘電体よりなる。クラッド層73表面には、電極74、75が設けられている。

【0049】フォトニック結晶の周期構造を有するコア層とそれを挟むクラッド層全体、即ち図11では、コア層72と、クラッド層71、73を併せた構造を、「スラブ型フォトニック結晶」と呼ぶことがある。クラッド層71、73は空気でもよい。

【0050】コア層71は、半導体よりなり、導電性が小さく導電損失の小さいi型、n型（弱いn型）又はp型（弱いp型）である。

【0051】クラッド層73には孔が開けられており、その孔（ビア）を通して、電極74、75がコア層72の電極80、81に接続している。

【0052】図12は、本発明の第2の実施の形態の構造を示す図であり、図11に示した構造を上方から透視した図である。i型、n型又はp型半導体のコア層76は、フォトニック結晶構造を有し、線欠陥光導波路77が形成されている。

【0053】コア層76の、線欠陥光導波路77を挟んで両側に、n型領域78とp型領域79が配設されており、それぞれの領域に、n型オーミック電極80又はp型オーミック電極81が形成されている。

【0054】本発明の第2の実施の形態の動作原理は、前記した本発明の第1の実施の形態と同じである。即ち、スイッチングしたい光信号のエネルギーは、スラブ型フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ内にあり、フォトニック結晶中に形成された線欠陥光導波路は、電極に、電流を注入するかあるいは電圧を印加する前は、フォトニックバンドギャップ内に伝搬モードを有する。

【0055】電極80と電極81の間に電流を注入するか、あるいは、逆バイアス電圧を掛けると、光が伝搬する線欠陥光導波路の周囲のフォトニック結晶のフォトニックバンド構造が変化し、線欠陥導波路の伝搬モードがフォトニックバンドギャップ外に出て、線欠陥導波路を光が伝搬できなくなる。

【0056】あるいは、元々、フォトニックバンドギャップ外にあった線欠陥導波路の伝搬モードが、電流、又は電圧の印加により、フォトニックバンドギャップ内に移行し、光を伝搬できるようになる。

【0057】本発明の第2の実施の形態の利点は、クラッド層として、非導電性の誘電体を用いることができるため、線欠陥導波路77を伝搬する光のクラッド層71、73による損失が無い。

【0058】次に、本発明の第2の実施の形態の具体例について以下に説明する。ノンドープSi（膜厚300nm）/SiO₂（膜厚2μm）/ノンドープSi基板構造のSOIウエハのノンドープSi層に、電子ビーム描画と塩素ガスによるSiドライエッチング加工により、図12に示すような、三角格子フォトニック結晶構造と線欠陥導波路を形成する。

【0059】フォトリソグラフィによりマスクを形成した後、砒素やボロンのイオン注入とその後の活性化アニール処理によって、n型領域78とp型領域79に相当する領域を形成する。その後、各イオン注入領域にオーミック金属を蒸着し、シンタリングを行って電極を形成する。n型領域78とp型領域79を形成するためのイオン注入は、フォトニック結晶構造を形成する前に行ってもよい。また、コア層の母材の導電型がn型又はp型の半導体の場合、コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極（従ってイオン注入領域も）は線欠陥光導波路の近くにある必要は無く、離れていてもよい。

【0060】この実施の形態の光スイッチを複数並設する場合には、線欠陥導波路の近くに設置する電極はコア層と反対の導電型の電極のみで、同じ導電型の電極は共通のものを線欠陥光導波路から離れたところに、最低1つ以上用意するようにしてもよい。

【0061】次に、本発明の第3の実施の形態について説明する。図6は、本発明の第3の実施の形態の構成を示す図である。図6を参照すると、この実施の形態と、図3に示した前記第1の実施の形態との違いは、フォトニック結晶を構成する半導体の屈折率を変化させる手段として、入射光21とは別の制御光41を用いていることである。

【0062】本発明の第3の実施の形態の動作原理について説明する。図4のエネルギーバンドにおいて、制御光41を照射しない時、エネルギーバンドは実線で示されるが、制御光41を照射した時には、キャリアが励起されることで、フォトニック結晶を構成するi型半導体33または34の屈折率が変化し、エネルギーバンドが、例えば図4の点線のように変化する。よって、前記第1の実施の形態と同様に、入射光21のエネルギーがΩ7であれば、制御光41の照射の有無（オン/オフ）で、出力光22をオン/オフできる。

【0063】なお、光照射による屈折率変化を起こす要因として、フォトニック結晶におけるキャリア数の変化（プラズマ効果）を挙げたが、媒質の3次の非線形光学特性である、光カー効果も考えられる。光カー効果は、制御光41を照射したときの媒質の屈折率nが、非照射の屈折率n₀と、3次の非線形光学定数に比例するn

2、光強度Iとして、

$$n = n_0 + n_2 * I \quad (\text{式1})$$

と表される現象である。

【0064】次に、本発明の第4の実施の形態について説明する。図7は、本発明の第4の実施の形態の構成を示す図であり、フォトニック結晶構造の平面図である。図7を参照すると、この実施の形態では、線欠陥導波路を用いて、マッハツェンダー型の干渉系を構成している。2つの電極36、36'は、分岐された2つのチャネルに効率的にキャリアを注入できるように付着されている。

【0065】次に、本発明の第4の実施の形態の動作原理について説明する。入射光21は線欠陥導波路からY分岐路によって上下枝2つの光路40、40'に等分配され、2つの光路を伝搬した光が、別のY分岐路によって合波されて出射光22となって出力される。電流注入を行わない場合、上下枝の光路長は等しいため、分岐された2つの光の位相差は零（同位相）であるから、その干渉光である出力光22の光強度は最大となる。なお、2つの光路長が異なっている場合、光路長差が波長の整数倍となるように設計しておけば、位相差が零の場合と等価である。

【0066】次に、上枝、下枝の少なくとも一方の電極を通して電流注入を行うことで屈折率を変化させると、その部分の実効的な光路長が変化する。上下枝での光路40、40'でπの位相差が生じたとすれば、干渉光である出力光22は、弱め合い光強度は最小となる。

【0067】このようにして、注入電流のオン/オフで、出射光22をオン/オフすることができる。なお、屈折率変化を起こす手段として、電流注入に限らず、逆バイアスの印加、入射光とは、別の制御光の照射であってもよい。

【0068】次に、本発明の第5の実施の形態について説明する。図8は、本発明の第5の実施の形態の構成を示す図である。図8を参照すると、この実施の形態では、フォトニック結晶50には、線欠陥導波路は導入されていず、完全結晶である。これは、スーパープリズム現象を利用した光スイッチである。スーパープリズム現象に関しては、文献（Applied Physics Letters vol.74 p.1370-1372 (1999)）に掲載されている通り、僅か1%の波長差で屈折角が50度以上も変化するという異常な分散特性である。

【0069】別の見方をすると、入射する光の波長を固定した時、屈折率を僅かに変化させることで、エネルギーバンドが変化し、それに応じて屈折角が大きく変化することが分かる。

【0070】つづいて本発明の第5の実施の形態の動作原理について、図8を参照して説明する。電流注入前の導波路51を介して、フォトニック結晶50の固有軸（Γ-XあるいはΓ-J）に対して斜めに入射され、フ

フォトニック結晶中を伝搬する光の軌跡は、フォトニック結晶の分散特性によって、図8の実線矢印で示されるとする。この時は、チャネル1 (ch1) の導波路52へ光が出力される。

【0071】電流注入を行うと、フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が変化し、それに応じて屈折角が変化することで、伝搬光の軌跡は、図8の波線矢印へと変化し、チャネル2 (ch2) の導波路52'へ光が出力されることになる。

【0072】上記では、出力側の導波路が2つからなる例について説明したが、出力側の導波路は3つ以上、あるいは1つとしても良い。また、屈折率を変化させる手段は、電流注入以外にも、逆バイアスの印加、入射光とは別の制御光の照射など、他の手段であってもよいことは勿論である。

【0073】次に、本発明の第6の実施の形態について説明する。図9は、本発明の第6の実施の形態の構成を示す図である。フォトニック結晶は、2次元平面内において、光の伝搬方向に垂直な方向の幅が1~2 μ m程度の導波路60となっており、導波路60の両側は、クラッド層61、61'によって挟まれている。本発明の第6の実施の形態は、入射光21それ自身の強度による、スイッチングを行うものである。

【0074】続いて、本発明の第6の実施の形態の動作原理について、図4および図10を参照して説明する。

【0075】はじめに、入射光21のエネルギーが Ω 8 (図4参照)である場合について説明する。入射光強度が弱い場合には、エネルギーバンドは、図4の実線で表され、この時、PBGの外側であるから、完全結晶である導波路部分を光は伝搬することができる。ところが、入射光強度をある程度強くすると、式(1)で表されるように、入射光の強度自身によって、フォトニック結晶の屈折率が変化し、それに伴ってエネルギーバンドが、図4の点線のように変化し、フォトニックバンドギャップ(PBG)内となるため、光は伝搬することができなくなる。

【0076】これに基づき、エネルギー Ω 8の入射光強度に対して、出射光強度をプロットしたグラフが、図10(a)である。入射光強度がある程度強くなると、出射光強度が頭打ちになり、その後は、次第に低下する。これは、リミッター機能といえる。このリミッター機能は、信号がオンの時の信号光強度を揃える整形機能として利用できる。

【0077】一方、エネルギーが Ω 7 (図4参照)の入射光に対しては、エネルギーが Ω 8の場合と逆で、図10(b)に示すように、入射光強度が小さいときには透過光強度が小さく、入射光強度が大きくなると透過光強度が飛躍的に増大する。この機能は、信号がオンとオフの時の信号光強度のコントラストを増大させる機能を有する。リミッター機能とコントラスト増大機能の組み合

わせが可能なことは勿論である。

【0078】上記第3乃至第6の実施の形態においても、図1、及び図11を参照して説明した第1、第2の実施の形態と同様に、フォトニック結晶構造によるコア層の上下をクラッド層で挟む構成としてもよいことは勿論である。

【0079】上記各実施の形態によれば、スイッチングの動作波長は構成材料の特性ではなく、フォトニック結晶の構造により決まるため、設計の自由度が大きくなり、フォトニック結晶を用いることで機能素子のコンパクト化が実現される。フォトニック結晶は、光通信において用いられている平面型微小光回路、半導体レーザー等は導波路構造を有しており、これらとの整合性をとる上でも導波路構造になっていることが望ましい。

【0080】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、3次元的に光閉じこめを行い、光を効率良く導波し、高速動作を可能とする、という効果を奏する。そして、本発明によれば、スイッチングの動作波長は構成材料の特性ではなく、フォトニック結晶の構造により決まるため、設計の自由度を増大する。

【0081】また本発明によれば、1つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現している。

【0082】さらに本発明によれば、信号がオンの時の信号光強度を揃える波形整形機能を実現している。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は2次元フォトニック結晶の構造例を上面から見た図である。(b)は2次元フォトニック結晶構造に対する逆格子ベクトルの方向を示した図である。

【図2】図1(a)の構造に対するエネルギーバンドの計算例を示す図である。

【図3】(a)は本発明の第1の実施の形態の構成を示す図である。(b)は(a)のフォトニック結晶層の構成を示す図である。

【図4】図3の構造に対するエネルギーバンドの計算例を示す図である。

【図5】本発明の第1の実施の形態の動作を示すタイミングチャートである。

【図6】本発明の第3の実施の形態の構成を示す図である。

【図7】本発明の第4の実施の形態の構成を示す図である。

【図8】本発明の第5の実施の形態の構成を示す図である。

【図9】本発明の第6の実施の形態の構成を示す図である。

【図10】本発明の第6の実施の形態の動作を説明するための図である。

【図11】本発明の第2の実施の形態の形態の構造を示す図である。

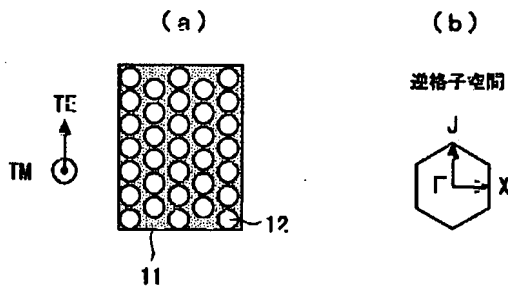
【図12】本発明の第2の実施の形態の構成を示す図である。

【符号の説明】

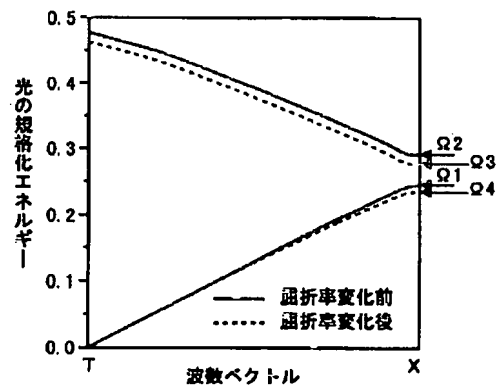
- 11 第1の媒質
- 12 第2の媒質
- 21 入射光
- 22 出射光
- 31 n型基板
- 32 n型クラッド層
- 33 i型半導体（母体媒質）
- 34 i型半導体
- 35 p型クラッド層
- 36、36' 電極
- 37 リード線
- 38 i型フォトニック結晶層
- 39 線欠陥導波路

- 40、40' 分岐した導波路
- 41 制御光
- 50 フォトニック結晶
- 51 チャネル導波路
- 52、52' チャネル導波路
- 60 導波路
- 61、61' クラッド層
- 70 基板
- 71 クラッド層
- 72 コア層
- 73 クラッド層74、
- 75 電極
- 76 コア層
- 77 線欠陥導波路
- 78 n型領域
- 79 p型領域
- 80 n型オーミック電極
- 81 p型オーミック電極

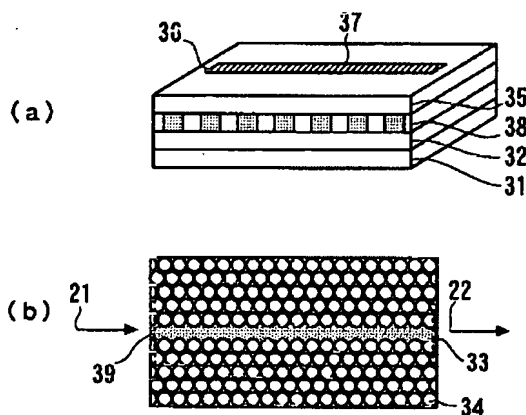
【図1】



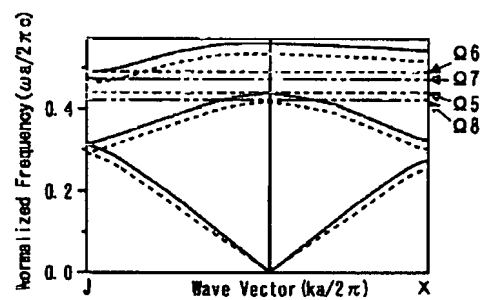
【図2】



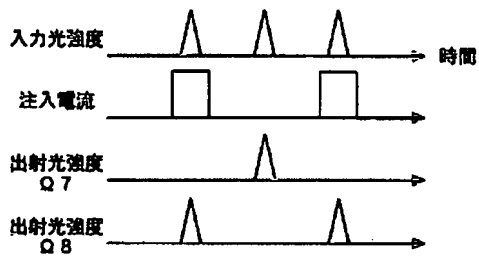
【図3】



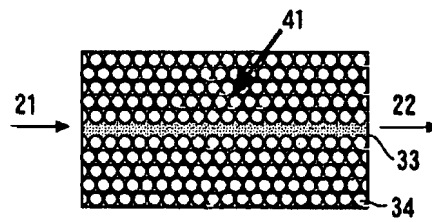
【図4】



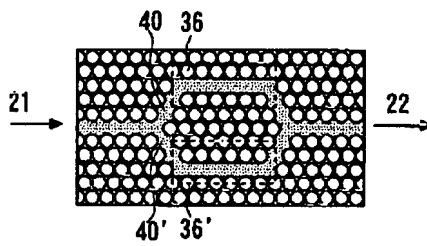
【図5】



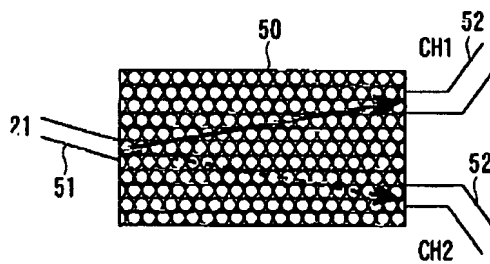
【図6】



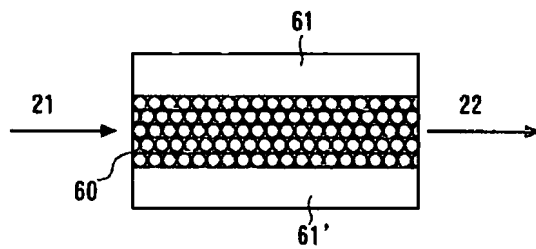
【図7】



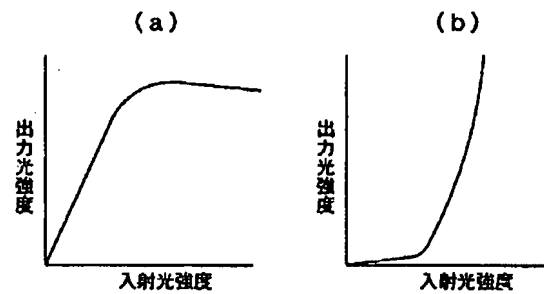
【図8】



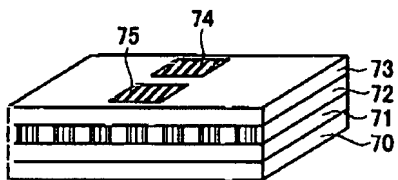
【図9】



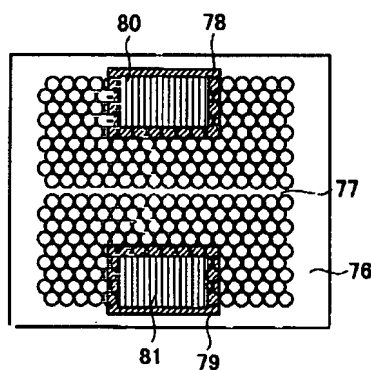
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	F I	(参考)
G 0 2 F 1/313		G 0 2 B 6/12	Z N J

Fターム(参考) 2H047 KA03 LA12 RA08 TA43
2H079 AA02 AA08 AA12 AA13 BA01
CA05 DA16 EA02 EA05
2K002 AA02 AB04 BA01 BA06 BA08
CA13 CA30 DA05 DA08 HA08

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 06-311114

(43)Date of publication of application : 04.11.1994

(51)Int.Cl. H04B 10/16

H01S 3/094

H01S 3/10

H04B 10/04

(21)Application number : 05-093153

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 20.04.1993

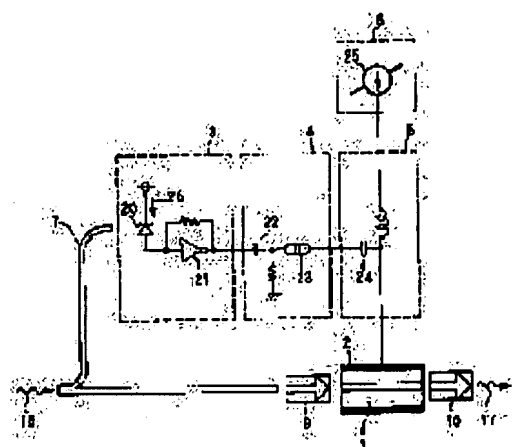
(72)Inventor : MIZUOCHI TAKASHI
KITAYAMA TADAYOSHI

(54) DISPERSION COMPENSATED LIGHT AMPLIFYING REPEATER

(57)Abstract:

PURPOSE: To execute inverse chirping without deteriorating S/N by receiving a part of incident light in a chirp signal generation circuit, improving the purity of frequency modulation and outputting it to prescribed electrode.

CONSTITUTION: A part of signal light 16 is branched in a light-branching circuit 7 and a branching destination is inputted to the photodiode 20 of pin and it is converted into photo current 26. Current 26 is amplified and inverted in a transformer impedance amplifier 21, is inputted to a differential circuit 22 and a phase is adjusted in a delay element 23. The circuit forms the chirp signal generation circuit and the current in the circuit becomes a chirp signal. The chirp signal is added with bias current generated from a variable current source 25 in a bias tee 24 and it is injected to a semiconductor light amplifier 1. Then, an optical frequency changes in accordance with current and frequency modulation is improved and it is outputted to prescribed electrode. Thus, dispersive compensation can effectively be executed, inverse chirping becomes possible and the extension of a waveform in a received electric field is prevented.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]	09.10.1997
[Date of sending the examiner's decision of rejection]	22.08.2000
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]	
[Date of final disposal for application]	
[Patent number]	3146089
[Date of registration]	05.01.2001
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	2000-014980
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	21.09.2000
[Date of extinction of right]	05.01.2006

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平6-311114

(43) 公開日 平成6年(1994)11月4日

(51) IntCl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 4 B 10/16				
H 0 1 S 3/094				
3/10		Z 8934-4M		
		9372-5K	H 0 4 B 9/ 00	J
		8934-4M	H 0 1 S 3/ 094	S

審査請求 未請求 請求項の数4 OL (全 9 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平5-93153

(22) 出願日 平成5年(1993)4月20日

(71) 出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72) 発明者 水落 隆司

鎌倉市大船五丁目1番1号 三菱電機株式
会社通信システム研究所内

(72) 発明者 北山 忠善

鎌倉市大船五丁目1番1号 三菱電機株式
会社通信システム研究所内

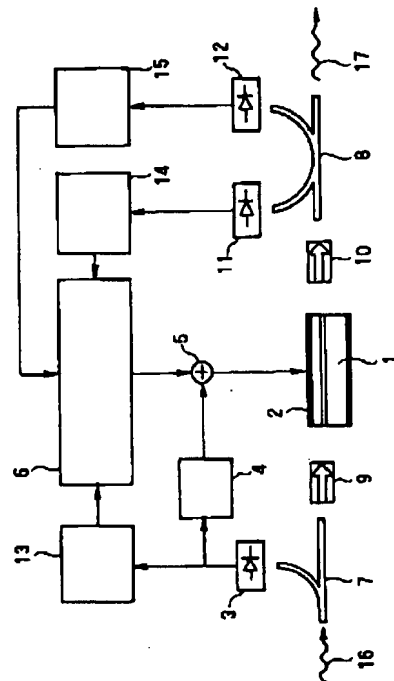
(74) 代理人 弁理士 高田 守

(54) 【発明の名称】 分散補償光増幅中継器

(57) 【要約】

【目的】 光増幅中継伝送システムにおいて、光ファイバの分散による波形劣化を補償する光増幅中継器を得る。

【構成】 任意の整数を n とする n 個の電極を備えた入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受けて上記電極の内、 k 番目の電極に出力するチャープ信号生成回路とを備えた。また、 n 個の電極を備えた入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受けて上記電極の内、少なくとも i 番目と j 番目の電極に向けて出力するチャープ信号生成回路と、このチャープ信号出力を入力とし、少なくとも移相または振幅変化させて j 番目の電極に出力する移相/振幅可変回路とを備えた。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 任意の整数を n とする n 個の電極を備え、入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受け、上記電極の内、 k 番目 ($0 \leq k \leq n$) の電極に出力するチャープ信号生成回路とを備えた分散補償光増幅中継器。

【請求項2】 任意の整数を n とする n 個の電極を備え、入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受け、上記電極の内、少なくとも i 番目と j 番目 ($0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n, i \neq j$) の電極に向けて出力するチャープ信号生成回路と、上記チャープ信号出力を受け、少なくとも移相または振幅変化させて上記 j 番目の電極に出力する移相/振幅可変回路とを備えた分散補償光増幅中継器。

【請求項3】 入射光を分岐し、上記分岐した一部は受光回路に接続され、上記分岐の他の一部は上記半導体増幅器に接続する光分岐回路を備え、上記受光回路の出力は上記チャープ信号生成回路の入力に接続されることを特徴とする請求項1または請求項2記載の分散補償光増幅中継器。

【請求項4】 上記半導体増幅器の一部の電極の出力が、上記チャープ信号生成回路の入力に接続されることを特徴とする請求項1または請求項2記載の分散補償光増幅中継器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 この発明は、光ファイバの分散により劣化した波形を補償する機能を有する光増幅中継器に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 高性能の光増幅器が開発されるようになり、高速かつ長距離の光中継伝送システムが実現しつつある。このようなシステムでは光ファイバの分散による波形歪みでシステム性能が著しく劣化することが問題となる。そのため伝送速度や距離がおのずと制限されてしまい、通信コストを増大させることにつながる。この問題は、現在最も広く使用されている $1.3 \mu\text{m}$ 帯に零分散波長を有する光ファイバに $1.55 \mu\text{m}$ の光信号を伝送するときに顕著になる。光ファイバの分散により劣化する波形を補償する技術には、事前に送信側のレーザに通常とは逆方向のチャープ（周波数偏移）を与えることにより、ファイバで波形が劣化するのを補償する第1の方法や、受信側で分散補償ファイバを通すことにより逆の分散を与える第2の方法や、伝送路の途中の中継器で位相変調を行うことによる第3の方法などが提案されている。第1の方法は例えば逸見直也、洲崎哲行、「光通信装置」特開平3-171941に、第2の方法は例えば水落隆司、北山忠善、「光ファイバ遅延等化器」特開平3-211530に詳しく示されている。第3の方法は例えば、青木恭弘、春原禎光「光ファイバ通

2

信方法およびシステム」特開平3-171036や高野勇、川端充、小山朋子「光予等化LR中継器の検討」1992年電子情報通信学会春季大会、B-928に詳しく示されている。図11は、第3番目の文献に示された従来の光中継器のブロック図である。図において、16は信号光、17は増幅された信号光、7は光分岐回路、3は受光回路、110は光増幅器、111はチャープ信号生成回路、112は外部位相変調器である。

【0003】 この動作について説明する。光信号16は、光増幅器110により伝送路損失を補償された後、外部位相変調器112に入力される。外部位相変調器112ではファイバの分散を補償するように、適当な位相変調を増幅された光信号に与える。位相変調信号はチャープ信号生成回路111により生成される。外部位相変調器に与える位相変調量は光ファイバの総分散量によって決定される。図12は、この原理を簡単に説明するものである。送信光源であるレーザダイオード (Laser Diode; LD) を図12(a)に示す変調電流にて直接変調するとチャープが発生することはよく知られている。これは、図12(b)に示すように、パルスの立上がり部分で光の周波数が高く、逆に立ち下がり部分では周波数が遅くなる現象で、このような光パルスを光ファイバに伝搬させると、図12(c)に示すように、分散の影響によりパルスの方はより早く進み、後方はより遅く進むことになる。つまり、波形が広がってしまうことになる。従来例は、図12(d)に示すように、外部位相変調器によりパルスの方の周波数を低く、後方の周波数を高くするもので、分散をキャンセルするだけのチャープを与えるものである。このようにすれば、図12(e)に示すように、ファイバ伝搬後も波形が劣化しない。

【0004】 これとは別に光中継器の利得をスイッチすることで、光信号のうち分散により広がった部分を切り取り、波形を振幅を整形する方法が考えられている。この方法は洲崎哲之「光波形整形方法及び光波形整形装置」特開平2-36581に示されたもので、半導体光増幅器のバイアス電流を入力信号のモニタ電流から精製した駆動電流でスイッチすることにより、半導体光増幅器の利得をスイッチし、余分に広がった部分を切り取り所望の波形に整形するものである。この方法で中継伝送距離を約3倍に延ばすことができる。この方法の問題点は、波形を切り取ることによって有効な信号成分を捨ててしまうため、光波形の信号対雑音比が本来光増幅器の自然放光でできる劣化以上に悪くなってしまうことである。これは最大中継伝送距離を短くしてしまう。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 従来の方式では、中継器の中に外部位相変調器を設ける必要があった。また光増幅器の利得をスイッチする方法もそうであるが、これらは、余分な光損失を伴うためシステムの信号対雑音比

(S/N比)を劣化させるという課題があった。また、外部位相変調器を設けることは、中継器を複雑にし、信頼性やコストの面で不利になるという課題があった。

【0006】本発明はかかる課題を解決するためになされたもので、S/Nを劣化させないで、また外部要素を少なくして逆チャープする装置を得ることを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】この発明に係る分散補償光増幅中継器は、任意の整数を n とする n 個の電極を備えた入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受けて上記電極の内、 k 番目($0 \leq k \leq n$)の電極に出力するチャープ信号生成回路とを備えた。また請求項2の発明の分散補償光増幅中継器は、任意の整数を n とする n 個の電極を備えた入射光を増幅出力する半導体増幅器と、入射光の一部を受けて上記電極の内、少なくとも1番目と j 番目($0 \leq i \leq n$, $0 \leq j \leq n$, $i \neq j$)の電極に向けて出力するチャープ信号生成回路と、このチャープ信号出力を入力とし、少なくとも移相または振幅変化させて上記 j 番目の電極に出力する移相/振幅可変回路とを備えた。また請求項3の発明は、請求項1または請求項2の分散補償光増幅中継器に更に、入射光を分岐し、この分岐した一部は受光回路に接続され、この分岐の他の一部は半導体増幅器に接続する光分岐回路を備え、上記受光回路の出力はチャープ信号生成回路の入力に接続されるようにした。また請求項4の発明は、請求項1または請求項2の分散補償光増幅中継器に更に、半導体増幅器の一部の電極の出力が、チャープ信号生成回路の入力に接続されるようにした。

【0008】

【作用】この発明における分散補償光増幅中継器は、入力光の極一部が分散検出に用いられ、光増幅器の電極にチャープ信号が加えられ、分散補償した信号出力が得られる。請求項2の分散補償光増幅中継器は、入力光の極一部が分散検出に用いられ、光増幅器の電極にチャープ信号が印加されると共に、この印加チャープ信号の位相または振幅が調整されて周波数変調の純度を高め、より正しく分散補償した信号出力が得られる。請求項3の分散補償光増幅中継器は、入力光が分岐して受光回路に入り、電気信号に変換される。変換後の電気信号がチャープ信号の生成、位相変調、振幅変更用に入力される。請求項4の分散補償光増幅中継器は、入力光が一部の電極で検出されて検出電気信号として出力されてチャープ生成用に入力され、生成後のチャープ信号が光増幅器の他の電極に加えられ、分散補償された信号出力が得られる。

【0009】

【実施例】実施例1. まず、本発明の最も基本的な適用例を説明する。図1は発明の第1の実施例を示す構成図である。図において、1は半導体光増幅器、2は電極、

3、11、12は受光回路、4はチャープ信号生成回路である。5は加算回路、6はバイアス回路、7、8は光分岐回路、9、10は光アイソレータ、13、14は監視制御回路、15は自動光出力制御回路、16は中継前の信号光、17は中継後の信号光である。

【0010】次に、動作について説明する。信号光16は光分岐回路7で分岐され一部、例えば10分の1は受光回路3に、また他の大部分は光アイソレータ9を通じて半導体光増幅器1に入射される。受光回路3に接続されたチャープ信号生成回路4は、信号光16の検波電流からチャープ信号を生成し、加算回路5を通じて半導体光増幅器1に印加する。チャープ信号を注入された半導体光増幅器1は光パルスの立上がり部分で周波数が低く、立ち下がり部分で周波数が高くなるように変調される。監視制御回路13は、受光回路3から抽出した上流からの監視信号を終端し、応答信号を発生するものである。また監視制御信号14は下流で発生した障害を受光回路11で検出し、それに応じた処置を行うための信号を発生する回路である。中継器出力は受光器12で一部がモニタされ、例えば出力レベルが一定になるように自動出力制御回路15によって半導体光増幅器のバイアス電流が調整される。

【0011】図1の主要部分の等価回路(実現回路例)を図2に、また、各部の波形を図3に示す。図2において、20はpinフォトダイオード、21はトランスインピーダンスアンプ、22は微分回路、23は遅延素子、24はバイアスティー、25は可変電流源、26はフォトカレントである。また図3において、(a)はフォトカレント25、(b)はトランスインピーダンスアンプ21の出力電流、(c)は微分回路22の出力電流、(d)は半導体光増幅器1の出力光波形、(e)は半導体光増幅器1の出力光の周波数を表したものである。

【0012】動作を説明する。光分岐回路7で信号光16の一部が分岐され、分岐先はpinフォトダイオード20に入力され、フォトカレント26に変換される。フォトカレント26は、トランスインピーダンスアンプ21で増幅、反転され、微分回路22に入力される。その後、遅延素子23で位相を調整される。ここでの電流を本発明では、チャープ信号と呼んでいる。チャープ信号は、バイアスティー24で可変電流源25から発生したバイアス電流と加算され、半導体光増幅器に注入される。半導体光増幅器にチャープ信号が注入されると、電流に応じて光周波数が変化する。これは、半導体光増幅器に電流が注入されると、活性層のキャリア密度が変化し、それに伴って屈折率が変化するため、出力光の周波数が変化する「キャリア効果」と呼ばれる原理を利用したものである。周波数の変化の方向を、光源で発生したチャープと逆の方向にし、大きさを、ファイバから受ける分散をキャンセルするだけの量にすると、結果と

して、受信端で波形は広がらないことになる。いま、送信LDで発生したチャープングをキャンセルするために必要な、トランスインピーダンスアンプの利得を以下で示す。チャープングを伴う信号光の電界 $e_0(t)$ を式*

* (1) で表す。

【0013】

【数1】

$$e_0(t) = \sqrt{(2P_0 \cos \omega_s t)} e^{j[(\omega_0 + \beta \cos(\omega_s t + \theta_1))t + \phi]} \quad \dots\dots (1)$$

【0014】ここで P_0 は光パワー、 ω_0 は光角周波数信号、 θ_1 は送信LDでの強度変調と周波数変調(チャープング)の位相差、 ϕ は光の初期位相である。信号は簡単のため角周波数 ω_s の余弦波とした。このとき、 e ※

※ $e(t)$ の瞬時角周波数 ν_1 は式(2)で表される。

10 【0015】

【数2】

$$\nu_1(t) = \omega_0 + \beta_1 \cos(\omega_s t + \theta_1) \quad \dots\dots (2)$$

$$i(t) = s P_0 \sin(\omega_s t + \theta_2) \quad \dots\dots (3)$$

【0016】一方、光/電気変換後のフォトカレント $i(t)$ は式(3)で与えられる。式(3)で、 s は受光器の感度を表す。フォトカレントは、 A 倍の利得を与えられ、反転微分されチャープ信号となる、これは式(4)で表される。また、半導体光増幅器の周波数変調感度を β_2 とすると、出射光の瞬時光角周波数は式★

★ (5) で与えられる。目的はチャープングをキャンセル

ことである。これは式(6)で表される。式(5)と式

20 (6) から次の式(7)が重要である。

【0017】

【数3】

$$-A \cdot di/dt = -A s P_0 \omega_s \cos(\omega_s t + \theta_2) \quad \dots\dots (4)$$

$$\nu_2(t) = \omega_0 + \beta_1 \cos(\omega_s t + \theta_1) - \beta_2 A s P_0 \omega_s \cos(\omega_s t + \theta_2) \quad \dots\dots (5)$$

$$\nu_2(t) = \omega_0 \quad \dots\dots (6)$$

$$A = \beta_1 / (\beta_2 s P_0 \omega_s) \quad \dots\dots (7)$$

【0018】即ち、式(7)が満足されればチャープングをキャンセルできることがわかる。ここで、利得 A は入射光パワー P_0 の関数であるので、入力レベルに応じて A を可変しなければならないことが判る。そのため、トランスインピーダンスアンプの次段に可変利得増幅器を用いるのが好ましい。実際の光増幅中継伝送システムでは、送信のLDで発生したチャープングをキャンセルするだけでなく、さらに深い逆チャープを与える。この場合、中継器を出た信号光は、ファイバの分散で、一時的に波形が時間軸上で圧縮されるが受信端で再び広がり、もとの波形になる。また、 β_2 は中継器でモニタすることが難しいためシステム敷設時に設定するが、経時変化があった場合のことを考えて中継器で与える逆チャープを大きめにすることもできる。逆チャープをかけず

ぎた場合、むしろ伝送特性がよくなることは T. Saito 他, "Prechirp technique for dispersion compensation for a high-speed long span transmission," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 3, No. 1, 1991. により知られている。

【0019】実施例2. 半導体光増幅器として電極を複数に分割したものをを用いると、より効果的に分散補償が行える。図4は複数に分割された電極を有する半導体光増幅器を用いた発明の実施例である。図において40は2電極半導体光増幅器、41は第1の電極、42は第2の電極、43はチャープ信号生成回路、44はバイアス回路である。第1の実施例と異なる点は、バイアス電流は第1の電極、第2の電極それぞれに分割して注入され、チャープ信号は光が出射するほうの第2の電極に印

加されることである。

【0020】実施例1のように電極が単一の半導体光増幅器では、周波数変調特性が平坦でなく、数MHz付近で感度が著しく低下し、変調波形が歪むという問題がある。これは、変調周波数が低い領域では熱の効果によりレッドシフト（電流増加に対して長波長側に光周波数が偏移する）が起こるのに対して周波数の高い領域ではキャリアの効果によりブルーシフト（電流増加に対して短波長側に光周波数が偏移する）が起こり、この2つの効果は位相が180°異なるため両者がクロスオーバーする周波数領域では打ち消しあうことに起因する。ところが、電極が2つに分割されると、活性層内で軸方向にキャリア密度が大きく変化するため低周波領域から高周波領域まで平坦な変調特性が得られるようになる。この原理は半導体レーザでは良く知られているが、本発明では、半導体光増幅器に対応しても適用し、同様の効果を得ている。

【0021】実施例3. 更に他の適用例を説明する。つまり、半導体光増幅器として電極を3つに分割したものを示した例で、図5示す実施例である。図において、50は3電極半導体光増幅器、51は第1の電極、52は第2の電極、53は第3の電極、54はチャープ信号生成回路、55はバイアス回路である。このように電極を3分割し、チャープ信号を第1の電極51と第3の電極53の両方から注入すると、より効率的に逆のチャージングを発生させることができる。

【0022】実施例4. 次に請求項2の発明を説明する。図6は第4の実施例を示す図である。図において60は2電極半導体光増幅器、61は第1の電極、62は第2の電極、63は可変減衰器、64は移相器、65はバイアス回路である。第2の実施例では、2電極半導体光増幅器の光が射出する側の電極にのみチャープ信号を印加する構成とした。この場合、周波数変調だけでなく、微小な強度変調まで発生し、波形を振幅方向に歪ませる原因となる可能性がある。しかし、図6に示すように、第1及び第2両方の電極に位相および振幅を調整して印加すれば、強度変動成分を完全にキャンセルしつつ、純粋な周波数変調が行える。実験により、両方の電極に注入するチャープ信号の位相をおよそ反転させたとき、強度変動成分がほぼキャンセルできることを確認している。

【0023】実施例5. 次に請求項4の発明を説明する。図7は第5の実施例を示すブロック図である。ここで用いる半導体光増幅器は第2の実施例で述べたのと同様の2電極構成のものであるが、ここでは第1の電極をフォトダイオードとして用いるのが特徴である。半導体光増幅器に変調された信号光を入射すると信号光は吸収されると同時に電子-正孔対が生成されフォトカレントとなり、電極から取り出せる。したがって、入射した信号光は外付けの光分岐回路を必要とせず電気信号に変

換される。

【0024】図8は第5の実施例の等価回路を表したものである。図において70は2電極半導体光増幅器、81は第1の電極部分に相当するフォトダイオード部、82は第2の電極に相当する光増幅部、73はフォトダイオード部のバイアス回路である。入射された信号光16は、まずフォトダイオード部81でわずかに吸収され、フォトカレントを発生する。発生したフォトカレントはトランスインピーダンスアンプ21で増幅、反転されチャープ信号発生回路4で微分、位相調整され加算回路5を通じて光増幅部82に注入される。光増幅部82では光増幅とともに逆チャープのための周波数変調がなされる。フォトダイオード部81が順バイアスされると、キャリア寿命で決まる時間で応答速度が制限される。これは通常1GHz以下であるのでそれ以上の高速応答を必要とする場合適当でない。したがってフォトダイオード部81は逆バイアスするのが望ましい。ただ、この場合、信号光の吸収の度合いが大きくなる。光増幅器の入力部に吸収損失があると、信号対雑音比を著しく劣化させるため好ましくない。

【0025】実施例6. 本実施例は、実施例5における吸収の度合いを小さくしたものである。即ち、この部分の作用長をできるだけ短くし、吸収損失を小さく抑えるか、もしくは前段に光増幅部を設けた3電極構成にする。図9は第6の実施例を示すブロック図である。これは第5の実施例の構成の半導体光増幅器を3電極構成にし、フォトダイオード部の前段に光増幅部を設ける構成としたものである。図において90は3電極半導体光増幅器、91は光増幅部となる第1の電極、92はフォトダイオード部となる第2の電極、93は光増幅およびチャープ部、94はバイアス回路である。入射した光信号16は第1の電極91の部分で十分増幅され、その後第2の電極の部分（フォトダイオード部）で吸収される。増幅器としては、初段の利得が十分大きいので吸収損失による信号対雑音比の劣化が最小限に抑えられる。

【0026】実施例7. 図10は第4の実施例と第5の実施例を組み合わせたものである。図において100は3電極半導体光増幅器、101は第1の電極、102は第2の電極、103は第3の電極、104はバイアス回路である。入射された信号光16は第1の電極101（フォトダイオード部）で吸収され、フォトカレントを発生し、これによりチャープ信号を生成する。生成されたチャープ信号は第2の電極と第3の電極に振幅と位相を違えて注入され、第5の実施例で述べたように強度雑音キャンセルされ周波数変調だけの逆チャープが発生できる。

【0027】

【発明の効果】以上のようにこの発明によれば、入力光の大部分を増幅出力する半導体増幅器と、入力光の一部から補償用のチャープ信号を生成するチャープ信号生成

回路を備えたので、外部位相変調器を用いることなく、S/N低下させることなく、有効に分散補償できる効果がある。請求項2の発明によれば、上記に加え、更に周波数変調の純度を高めてより正しく分散補償ができる効果がある。請求項3の発明によれば、上記に加え、信号生成、利用がより自由にできる効果がある。請求項4の発明によれば、上記に加え、増幅器自体の一部が検出器になり、更に構成が簡単になる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光増幅中継器の第1の実施例を示すブロック図である。

【図2】本発明の光増幅中継器の第1の実施例の等価回路図である。

【図3】本発明の光増幅中継器の第1の実施例の動作を説明するための補足図である。

【図4】本発明の光増幅中継器の第2の実施例を示すブロック図である。

【図5】本発明の光増幅中継器の第3の実施例を示すブロック図である。

【図6】本発明の光増幅中継器の第4の実施例を示すブロック図である。

【図7】本発明の光増幅中継器の第5の実施例を示すブロック図である。

【図8】本発明の光増幅中継器の第5の実施例の等価回路図である。

【図9】本発明の光増幅中継器の第6の実施例を示すブロック図である。

【図10】本発明の光増幅中継器の第7の実施例を示すブロック図である。

【図11】従来の光増幅器の例を示すブロック図である。

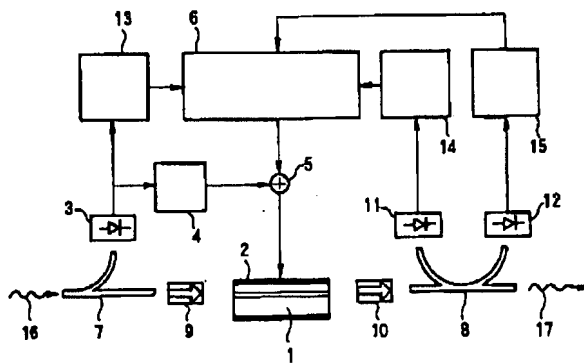
【図12】従来例の動作を説明するための補足図である。

【符号の説明】

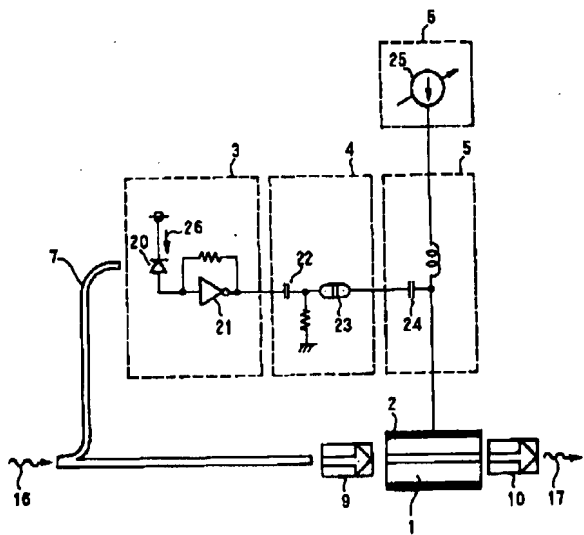
- 1 半導体光増幅器
- 2 電極
- 3, 11, 12 受光回路
- 4 チャープ信号生成回路
- 5 加算回路
- 6 バイアス回路
- 7, 8 光分岐回路
- 9, 10 光アイソレータ
- 13, 14 監視制御回路
- 15 自動光出力制御回路

- 16 中継前の信号光
- 17 中継後の信号光
- 20 pinフォトダイオード
- 21 トランスインピーダンスアンプ
- 22 微分回路
- 23 遅延素子
- 24 バイアスティー
- 25 可変電流源
- 26 フォトカレント
- 40 2電極半導体光増幅器
- 41 第1の電極
- 42 第2の電極
- 43 チャープ信号生成回路
- 44 バイアス回路
- 50 3電極半導体光増幅器
- 51 第1の電極
- 52 第2の電極
- 53 第3の電極
- 54 チャープ信号生成回路
- 55 バイアス回路
- 60 2電極半導体光増幅器
- 61 第1の電極
- 62 第2の電極
- 63 可変減衰器
- 64 移相器
- 65 バイアス回路
- 70 2電極半導体光増幅器
- 70 2電極半導体光増幅器
- 73 フォトダイオード部のバイアス回路
- 81 第1の電極部分に相当するフォトダイオード部
- 82 第2の電極に相当する光増幅部
- 90 3電極半導体光増幅器
- 91 光増幅部となる第1の電極
- 92 フォトダイオード部となる第2の電極
- 93 光増幅およびチャープ部
- 94 バイアス回路
- 100 3電極半導体光増幅器
- 101 第1の電極
- 102 第2の電極
- 103 第3の電極
- 104 バイアス回路
- 110 光増幅器
- 111 チャープ信号生成回路
- 112 外部位相変調器

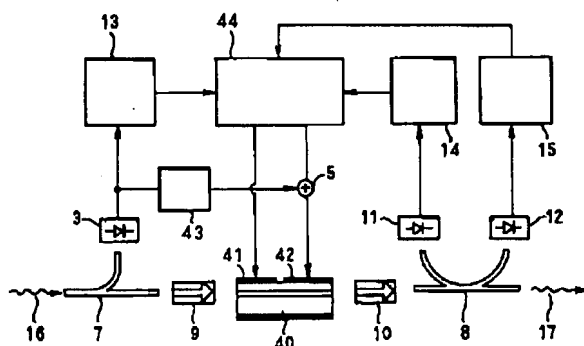
【図1】



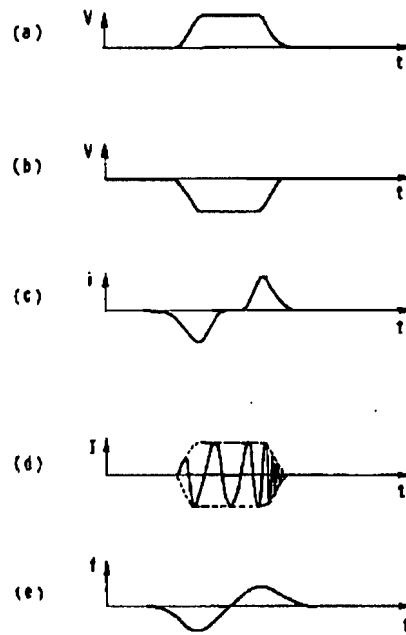
【図2】



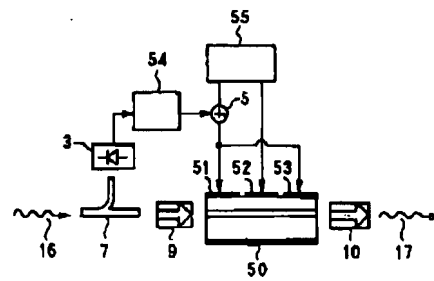
【図4】



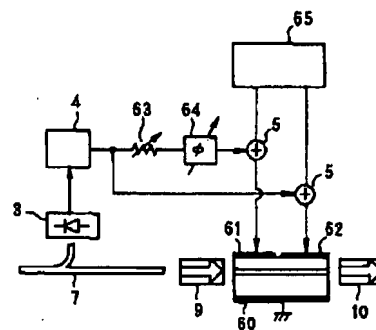
【図3】



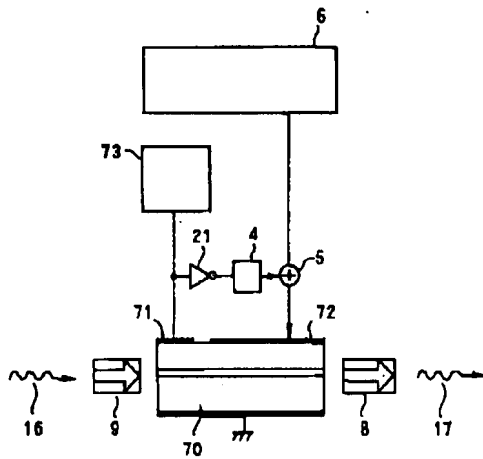
【図5】



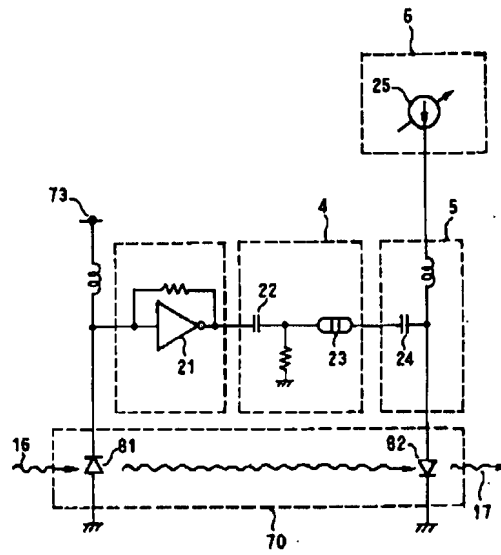
【図6】



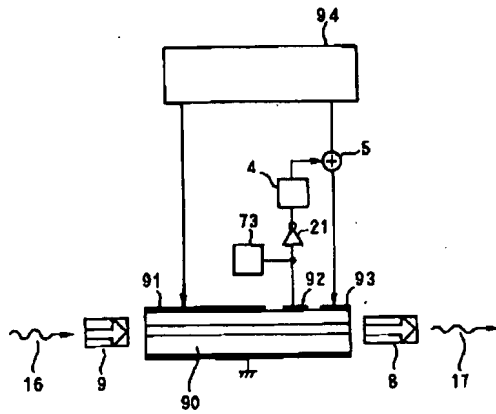
【図7】



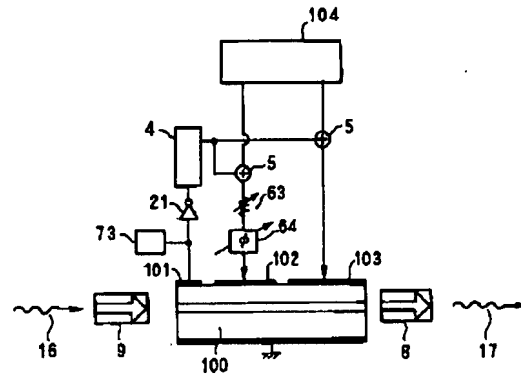
【図8】



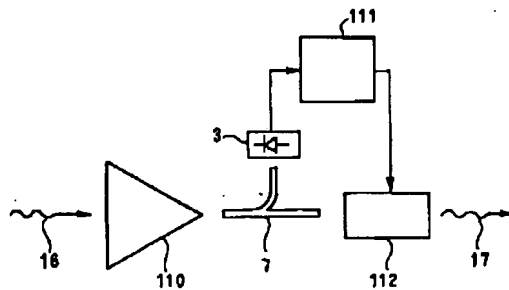
【図9】



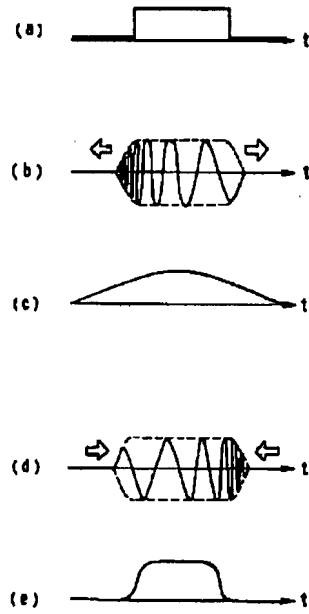
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁵
H 0 4 B 10/04

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

9372-5K

H 0 4 B 9/00

S

JP2000121987

Title:
WAVELENGTH DISPERSION COMPENSATOR

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To compensate the distortion of light pulse waveforms by wavelength dispersion by compact means. **SOLUTION:** Chirped incident pulse light 1 in which the wavelength dispersion occurs is made incident on the end face of a photonic crystal 3 by a focusing lens 2. When the incident pulse signal light 1 propagates in this photonic crystal 3, the chirp is lessened by the dispersion characteristic of the photonic crystal 3. The pulse signal light emitted from the end face on the side opposite to the incident side is collimated by a collimating lens 4 to collimated light, which is made into exit pulse light 5. The photonic crystal 3 has a bulk structure in which media 7 having a second refractive index n_2 are periodically embedded in a two-dimensional triangular grid form into a medium 6 having a first refractive index n_1 . One of the two media varying in the refractive index may be air or vacuum. The periodic structure is not limited to the two-dimensional triangular grids and may be two-dimensional period structures of square grids, long grids, diagonal grids, etc., or may be a three-dimensional period structure.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-121987

(P2000-121987A)

(43) 公開日 平成12年4月28日 (2000.4.28)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト* (参考)
G 0 2 B 27/00		C 0 2 B 27/00	Z 5 K 0 0 2
H 0 4 B 10/02		H 0 4 B 9/00	M
10/18			Q
10/14			
10/135			

審査請求 有 請求項の数 6 O L (全 7 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平10-298532

(22) 出願日 平成10年10月20日 (1998. 10. 20)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 白根 昌之

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100105511

弁理士 鈴木 康夫 (外1名)

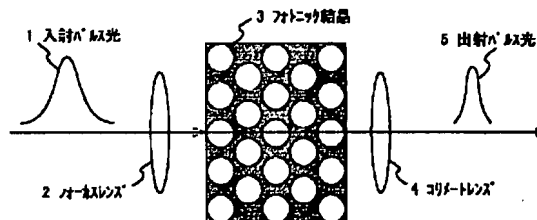
Fターム(参考) 5K002 BA02 CA01 FA01

(54) 【発明の名称】 波長分散補償器

(57) 【要約】

【課題】 波長分散による光パルス波形の歪みをコンパクトな手段により補償する。

【解決手段】 波長分散が生じている、チャープのついた入射パルス光1は、フォーカスレンズ2によってフォトニック結晶3の端面に入射される。入射されたパルス信号光1は、フォトニック結晶3を伝播すると、フォトニック結晶3の分散特性によりチャープが低減される。そして、入射側とは反対側の端面から出射されるパルス信号光は、コリメートレンズ4によってコリメート光となり、出射パルス光5となる。フォトニック結晶3は、第1の屈折率 n_1 を有する媒質6中に第2の屈折率 n_2 を有する媒質7が2次元三角格子状に周期的に埋め込まれたバルク構造になっている。屈折率の異なる2つの媒質のうち、一方は空気または真空でもよい。周期構造は2次元三角格子に限らず、正方格子、長方格子、斜方格子等の2次元周期構造、あるいは3次元周期構造でもよい。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光パルス伝送路における波長分散を低減させる波長分散補償器において、
前記波長分散補償器は、屈折率の異なる媒質を2次元格子状または3次元格子状に周期的に配列したフォトニック結晶を含み、前記フォトニック結晶の波長分散特性によって光パルス信号の波長分散補償を行うことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項2】 前記フォトニック結晶の分散の大きい領域での波長分散特性を利用したことを特徴とする請求項1記載の波長分散補償器。

【請求項3】 前記波長分散補償器は光導波路構造を有し、前記光導波路構造のコアの部分が屈折率の異なる媒質を周期的に配列したフォトニック結晶からなることを特徴とする請求項1記載の波長分散補償器。

【請求項4】 前記フォトニック結晶は、動作波長において透明で、かつ屈折率の異なる2つの媒質が周期的に配列された周期構造を有していることを特徴とする請求項1または2記載の波長分散補償器。

【請求項5】 前記フォトニック結晶の波長分散特性を制御する手段を備えていることを特徴とする請求項1または2記載の波長分散補償器。

【請求項6】 前記フォトニック結晶の波長分散特性を制御する手段は、前記フォトニック結晶を含む素子を加熱または冷却する手段によって構成されていることを特徴とする請求項5記載の波長分散補償器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光ファイバなどの光パルス伝送路において生じた波長分散を相殺することにより伝送歪みを低減するための波長分散補償器に関する。

【0002】

【従来の技術】希土類元素であるエルビウム (Er) を添加した光ファイバ増幅器の発達により、波長1.55 μm 帯での長距離大容量伝送が可能となった。しかし、現在一般に光通信の伝送路として敷設されている零分散波長を1.3 μm 帯にもつ単一モード光ファイバ (以下、1.3 SMF と呼ぶ) を用いて1.55 μm 帯の伝送を行う場合、零分散波長がずれているために大きな波長分散が生じて光信号が歪んでしまうという問題がある。

【0003】そのため、1.3 SMF を用いて1.55 μm 帯での光通信を行うには、この波長分散を打ち消す技術が必要となる。その技術の一つとして、1.3 SMF とは符号が逆で大きな波長分散をもつ分散補償光ファイバ (以下、DCF と呼ぶ) を用いて、1.55 μm 帯での波長分散を相殺する方法がある。この方法を用いた具体的な分散補償構造の一つの例が、特開平6-11620号公報に開示されている。

【0004】この公報に開示されているDCFは、コアとクラッドの屈折率分布を適切に選択することにより、所望の分散特性が実現されている。この方法は、DCFを伝送路に直列に挿入すればよいため、簡便な方法といえる。DCFの波長分散の絶対値は、1.3 SMFのそのせいぜい10倍程度であり、例えば、50 km ごとの中継地で分散補償をしようとするれば、5 km ほどの長さが必要となる。

【0005】通常、DCFを伝送装置に組み込む際には、コンパクト化した方が取り扱いが便利となるので、コイル状に巻いてパッケージにして伝送装置に組み込んで使用される。しかし、光ファイバをコイル状に巻く場合、光ファイバを曲げることによる放射損失を避けることを考えると、コイルの直径をあまり小さくすることはできないので、分散補償装置のコンパクト化には限度がある。

【0006】他の従来技術としては、平面光回路 (以下、PLC と呼ぶ) 上に遅延路をもうける方法がある。その具体例がエレクトロニクス・レターズ第31巻25号2193項 (ELECTRONICS LETTERS, Vol. 31, No. 25, P. 2193) に開示されている。このPLCは、Si基板上に導波路が形成されており、その導波路は、9つの対称および8つの非対称マッハツェンダー干渉計により構成されている。非対称干渉計の一方には、熱-光位相シフトが備えてあり、温度制御によって光路長を変化させ、分散補償を行っている。

【0007】このPLCの大きさは76×88 mmである。温度を変化させることにより、このPLCでは帯域16 GHz で-681~786 ps/nm という正から負の値の波長分散特性が得られている。1.3 SMFは17 ps/nm/km 程度の波長分散量であるから、このPLCを用いるには約50 km ごとに中継すればよいことになる。しかし、帯域が16 GHz と狭く、20 Gb/s 以上の高速通信や、波長多重の場合には使用することができない。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】上記従来の波長分散補償の方法では、大きさをコンパクトにし、かつ補償帯域を広くするのは困難であった。

【0009】本発明の目的は、例えば、1.3 SMF中を波長1.55 μm の光信号を伝送する時に生じる波長分散を相殺することができる、コンパクトかつ簡便な手段を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明による波長分散補償器は、屈折率の異なる2つの媒質を2次元格子状または3次元格子状に周期的に配列したフォトニック結晶を含み、前記フォトニック結晶の分散の大きい領域での波長分散特性を制御することによって波長分散補償を行うことを特徴とする。

【0011】また、本発明の波長分散補償器は、フォトニック結晶内に光パルスを高効率に閉じ込めるため、波長分散補償器が光導波路構造を有し、その光導波路構造のコアの部分が前記フォトニック結晶によって構成されていることを特徴とする。

【0012】さらに、本発明の波長分散補償器は、フォトニック結晶を含む素子の温度を制御することにより、フォトニック結晶の波長分散特性を制御する手段を備えていることを特徴とする。

【0013】本発明では、フォトニック結晶の中の、特に分散の大きい領域での波長分散特性を利用することにより、光パルス伝送路で生じた波長分散を補償する。通常の光学結晶では、分散特性が大きく変化するのは共鳴領域であり、吸収による損失を避けられない。しかしながら、屈折率の異なる2つの媒質を光の波長程度に周期的に並べた構造を持つ結晶、すなわちフォトニック結晶では、非共鳴領域においても大きな分散特性を示す。

【0014】波長分散量が大きければ分散補償に必要な素子の大きさが小さくてよく、コンパクトな波長分散補償器を提供することができる。また、フォトニック結晶を構成する2つの媒質の屈折率を変えたり、あるいは2つの媒質の繰り返し形状を変えることで、その動作波長および波長分散の大きさは容易に制御することができるため、簡便な方法によって波長分散量を制御することができる。

【0015】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による波長分散補償器の第1の実施の形態を示す図である。図1において、波長分散が生じている、すなわちチャープのついた入射パルス光1は、フォーカスレンズ2によってフォトニック結晶3の端面に入射される。入射されたパルス信号光1は、フォトニック結晶3を伝播すると、フォトニック結晶3の分散特性によりチャープが低減される。そして、入射側とは反対側の端面から出射されるパルス信号光は、コリメートレンズ4によってコリメート光となり、出射パルス光5となる。

【0016】図2は、フォトニック結晶3の概略図を示しており、第1の屈折率 n_1 を有する媒質6中に第2の屈折率 n_2 を有する媒質7が2次元三角格子状に周期的に埋め込まれたバルク構造になっている。屈折率の異なる2つの媒質のうち、一方は空気または真空中でもかまわない。周期構造は図2に示した三角格子の場合に限ら

ず、正方格子、長方格子、斜方格子等、種々の2次元周期構造の他、3次元周期構造をとることができる。

【0017】図2の2次元周期構造は次のような方法によって製作可能である。すなわち、第1の屈折率 n_1 を有する媒質6を材料とする基板にエッチングによって周期的な穴をあけた後、その穴に第2の屈折率 n_2 を有する媒質7を埋め込む。もしくは単に穴をあけたままにする、つまり第2の屈折率を有する媒質7を空気とする方法である。

【0018】次に、本発明による波長分散補償動作について、図3～図7を参照して説明をする。図3のフォトニック結晶3は、図2に示す三角格子の周期構造となっている。また、第1の屈折率 n_1 を有する媒質をSi、第2の屈折率 n_2 を有する媒質を空気としている。空気穴の直径は $0.80\mu\text{m}$ 、配列ピッチは $0.87\mu\text{m}$ である。光パルスの伝播方向の長さは5mmとしている。なお、空気穴の中に他の媒質例えばSiO₂を埋めるなど、屈折率の異なる媒質によって形成してもよい。これとは逆に、エッチングによって円柱部分を残すようにしてもよい。また、媒質をSiではなく、動作波長において透明な、例えばGa_{0.5}N_{0.5}などの他の材料としても作製可能である。

【0019】この三角格子の周期構造は、六方対称に対応し、等価的な正六角形構造のブリルアンゾーンが形成される。正六角形の頂点がJ点、各辺の中点がX点、そして波数 $k=0$ となるのがΓ点である。また、J面(X面)とは、Γ点からJ点(X点)方向に垂直な面のことを指す。

【0020】図4は、前記Siと空気からなる三角格子に対するエネルギーバンドの構造を表している。縦軸は規格化したエネルギー($\omega a/2\pi c$)を表し、横軸は第一ブリルアンゾーン内での規格化した波数($ka/2\pi$)を表している。ここで、 a は格子間隔、 c は真空中での光速、 ω は光の振動数、 k は波数をそれぞれ表す。ここには磁場の偏波面が周期構造をなす2次元平面内にあるTMモードのみを示しており、これを例にとって説明する。

【0021】一般に、媒質中で波束が進行する速度、すなわち群速度 V_g は次の式1で定義される。

【0022】

【数1】

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} = c \frac{d(\omega a/2\pi c)}{d(ka/2\pi)} \quad (\text{式1})$$

この値は、図4ではそれぞれの分枝の傾きに光速を掛けた値になっている。図4中のバンドのうち、下から3番目のΓ-X間(図中には太線で示してある)の分枝はとくに傾きが小さい、すなわち群速度が非常に遅くなっている。群速度が遅いと実効的な光路長が長くなるため、

通常の結晶に比べてより短い長さでの分散素子ができることが期待できるので、この分枝を利用することにする。図5は、この分枝の分散拡大図である。

【0023】光ファイバにおける波長分散を表すパラメータDは式2で表される。

【0024】

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{dk}{d\omega} \right) = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) \quad \text{【数2】} \quad (式2)$$

群速度 V_g の逆数、つまり図5では傾きの逆数の変化が大きいほど D の絶対値は大きくなる。式2を用いれば D の符号は Γ 点近傍では負、 X 点近傍では正となり、かつ V_g が0に急激に近づいているためにその絶対値は非常に大きくなることが分かる。

【0025】図3において、入射パルス光1として1.3SMFを伝送してきた波長1.55 μm の光パルス信号の場合を考える。この波長における1.3SMFの波長分散 D は正である。すなわち、パルス光の前方、つまりフォトリソニック結晶3に近い方には短波長成分が、後方には長波長成分が偏在するチャープのかかったパルス光となっている。そこで、図5において、 D の値が大きな負値となる Γ 点付近の波長分散特性を利用すればよいことになる。

【0026】式2を用いてその波長分散を求めると図6となる。図6では1.55 μm 近傍での分散特性を示しており、1.55 μm における値は-75ps/nmである。1.3SMFの1.55 μm における波長分散の大きさは17ps/nm/km程度であるから、例えば50km毎に中継して補償しようとするれば、波長分散の大きさは17 \times 50=850ps/nmとなるから、-850ps/nmの波長分散が必要になる。

【0027】従って、実施例に示す長さ5mmのフォトリソニック結晶を直列に12個つなぎ合わせることによって50kmの光ファイバ中での波長分散が補償できるので、数cm角の基板上に作製することが可能となり、従来のDCFによる分散補償方式とと比較して小型化することができる。また、このときの帯域は200GHz以上であり、従来のPLCによる分散補償方式において得られた帯域16GHzの10倍以上とすることができ、高速かつ波長多重の伝送に用いることが可能となる。

【0028】逆に、入射パルス光1が、 D の符号が負の伝送路を伝播してきたとすれば、 Γ 点の代わりに X 点付近の波長分散特性を利用することで分散補償が可能となる。式2を用いて X 点近傍での波長分散特性を求めると図7となる。このとき例えば1.59 μm における値は+32ps/nmであり、1.55 μm の場合とは逆符号の分散特性をもつことになる。これにより、1.59 μm 付近において負の波長分散を有する伝送路を伝播してきたパルス光の波長分散補償が可能となる。

【0029】図4において、エネルギーを示す縦軸は $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ の値であり、ここに λ は波長である。本実施例では下から3番目の分枝の Γ 点近傍、縦軸でいえば0.5613が波長 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ に対応していたが、三角格子の繰返し pitch a を変化させる

ことで対応する波長を変化させることが可能である。すなわち、本実施例において波長1.55 μm だったものが a を1/2にすれば0.775 μm になる。この場合、穴の直径も同様に1/2にする。

【0030】よって、図5における Γ 点および X 点両近傍での分散特性と三角格子の配列 pitch を変化させることで任意の波長における正負両符号の波長分散を作り出すことができることが分かる。またその絶対値はパルス光の伝播距離、つまり素子長を変えることで制御できる。以上により、任意の波長における任意の波長分散量を補償できることがわかる。

【0031】以上のように、本発明によれば、フォトリソニック結晶の特異な分散特性を利用することでチャープのかかった光パルス波形を復元することができるが、出射パルス光5は入射パルス光1よりもパルス幅が短くなっているため、この分散補償はパルス圧縮を行なっているとも言えることができる。

【0032】図8は、本発明による波長分散補償器の第2の実施の形態を示している。この第2の実施の形態においては、フォトリソニック結晶内に光パルスを高効率に閉じ込めるために光導波路構造を採用している。

【0033】すなわち、Si基板11上に、厚さ約5 μm のSiO₂クラッド層12を積層する。そしてこの上に厚さ2 μm のSi層13を積層し、エッチングによってSi層13に三角格子状に直径が0.80 μm 、配列 pitch が0.87 μm の穴をあける。これにより空気円柱14が形成される。

【0034】Si層13に空気円柱14が周期的に配列されているためこれらはフォトリソニック結晶を形成し、光導波路のコアの部分となる。さらにこの上にSiO₂を2.5 μm 積層してクラッド層15とする。ただし、厚さ0.3 μm のバルク層を残してストライプ状にエッチングし、ストライプ幅3 μm 前後のリッジストライプ構造を形成する。

【0035】この構造によって、コア層であるフォトリソニック結晶に光パルスが十分効率よく閉じ込められ、損失を抑えている。導波路の長さは5mmである。光パルスの入射方向は図8中に矢印で示してあり、結晶への入射面はX面である。フォトリソニック結晶の分散の大きい領域においては、光導波路の導波モードの分散特性を支配するのはフォトリソニック結晶の分散特性そのものであり、第1の実施の形態と同様な動作特性が得られる。第1の実施の形態との違いは、光を導波層に閉じ込めている点だけである。

【0036】図9は、本発明による波長分散補償器の第

3の実施の形態を示している。この第3の実施の形態は、第1の実施の形態に対して、フォトニック結晶3の温度を変化させるヒータ21と温度計22、温度を制御する温度コントローラ23を加えた構造となっている。温度コントローラ23で温度を設定し、温度計22が設定温度を示すようにヒータ21の熱量を制御する。

【0037】屈折率は温度に依存するという性質をもつため、フォトニック結晶3に熱を加えると図4のバンド構造が変化する。その結果、図6および図7に示した波長分散量が変化する。従って、既に施設されている光ファイバの波長分散のばらつき、あるいはフォトニック結晶3の作製上の誤差などを、この温度制御によって相殺することができるようになる。

【0038】温度調節手段として、ヒータ23の代わりに冷却素子を用いても構わない。また、加熱と冷却の2つの素子を組み合わせることにより温度調節をする手段も考えられる。

【0039】なお、実施例では、1.3 SMFでの波長1.55 μm の光信号を伝送する場合の波長分散補償器について説明したが、本発明におけるフォトニック結晶を含む波長分散補償器は、1.3 SMFでの波長1.55 μm の光信号に限らず、任意の波長分散を有する光パルス伝送路における波長分散を相殺する、コンパクトかつ簡便な波長分散補償器として構成することができる。

【0040】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、フォトニック結晶という波長分散特性を自由に制御できる媒質を分散補償素子として用いる基本構成に基づき、従来からある分散補償光ファイバや平面光回路と比較してよりコンパクトな波長分散補償器が提供される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による波長分散補償器の第1の実施の形態を示す図である。

【図2】本発明で用いられる2次元フォトニック結晶の例を示す概略図である。

【図3】本発明の波長分散補償器の動作を説明するための補足図である。

【図4】本発明のフォトニック結晶で得られるバンド構造を示す図である。

【図5】本発明で用いる Γ -X間の下から3番目の分枝の分散拡大図である。

【図6】本発明の第1の実施例による波長分散補償器の波長分散（負の波長分散）特性図である。

【図7】本発明の第1の実施例による波長分散補償器の波長分散（正の波長分散）特性図である。

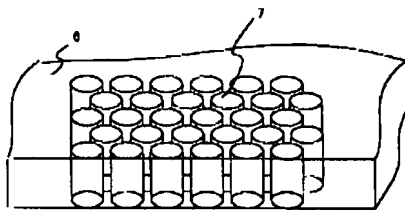
【図8】本発明による波長分散補償器の第2の実施の形態を示す図である。

【図9】本発明による波長分散補償器の第3の実施の形態を示す図である。

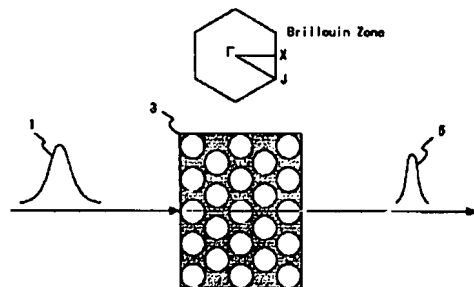
【符号の説明】

- | | |
|----|------------------------|
| 1 | 入射パルス光 |
| 2 | フォーカスレンズ |
| 3 | フォトニック結晶 |
| 4 | コリメートレンズ |
| 5 | 出射パルス光 |
| 6 | 屈折率 n_1 を有する媒質 |
| 7 | 屈折率 n_2 を有する媒質 |
| 11 | Si基板 |
| 12 | SiO ₂ クラッド層 |
| 13 | Si層 |
| 14 | 空気円柱 |
| 15 | SiO ₂ クラッド層 |
| 21 | ヒータ |
| 22 | 温度計 |
| 23 | 温度コントローラ |

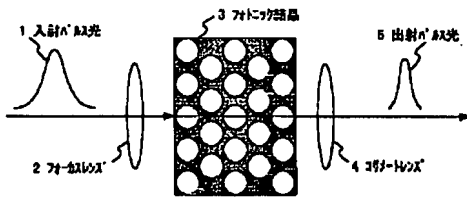
【図2】



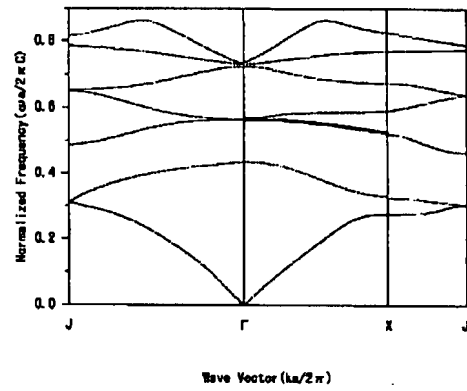
【図3】



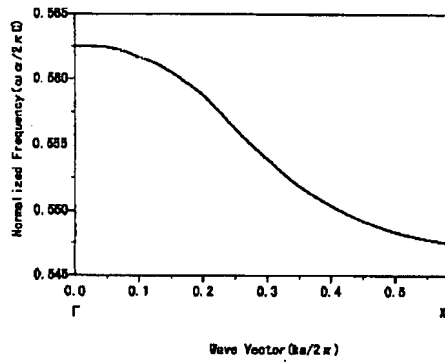
【図1】



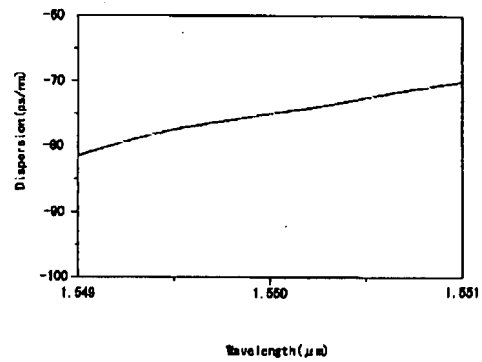
【図4】



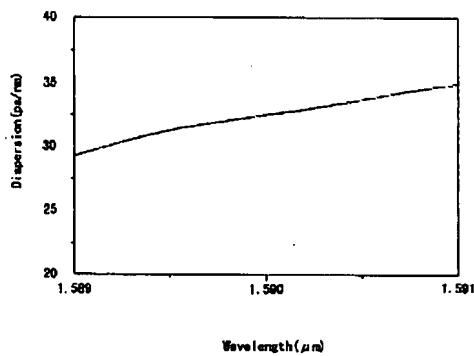
【図5】



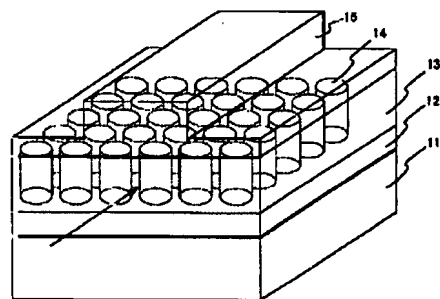
【図6】



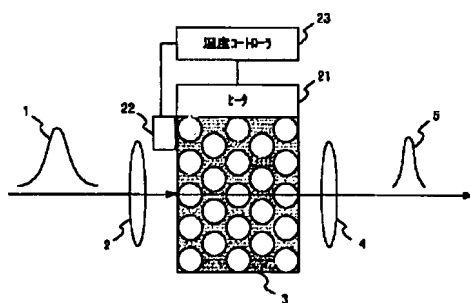
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(51)Int. Cl.⁷

H04B 10/13

10/12

識別記号

F I

(参考)

JP06311114

Title:
No title available

Abstract:

JP2003279764

Title:

**TWO DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL OPTICAL MULTIPLEXER AND
DEMULTIPLEXER**

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical multiplexer and demultiplexer which
can be downsized and has high efficiency and Q value.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2003-279764
(P2003-279764A)

(43) 公開日 平成15年10月2日 (2003.10.2)

(51) Int.Cl.⁷
G 0 2 B 6/12

識別記号

F I
C 0 2 B 6/12

データベース* (参考)
F 2 H 0 4 7
Z

審査請求 有 請求項の数17 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2002-86221(P2002-86221)

(22) 出願日 平成14年3月26日 (2002.3.26)

(71) 出願人 396020800
科学技術振興事業団
埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(72) 発明者 野田 進
京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舍231号
(72) 発明者 望月 理光
長野県茅野市金沢2050番地 金沢精和荘
320号室
(74) 代理人 100093670
弁理士 小林 良平 (外1名)

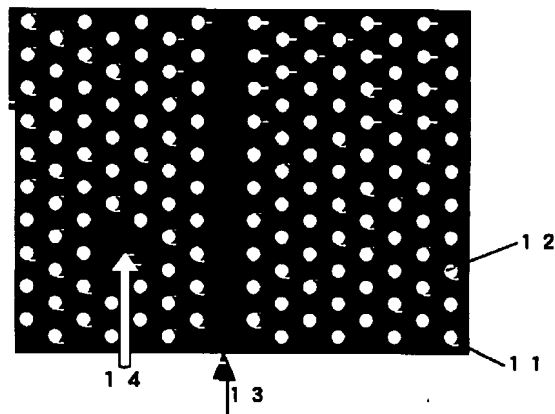
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元フォトニック結晶光分合波器

(57) 【要約】

【課題】 小型化が可能であり、かつQ値及び効率の高い光分合波器を提供する。

【解決手段】 スラブ状の本体11に、本体11の材質よりも低屈折率の領域(空孔)12を周期的に配置することにより2次元フォトニック結晶を作製する。その中で空孔12を線状に設けないことにより導波路13を形成する。導波路13に隣接した場所の2個以上の格子点で空孔12を設けないことにより、ドナー型クラスタ欠陥14を形成する。このような構成により、導波路13を伝播する光のうち特定の波長の光だけがドナー型クラスタ欠陥14において共振し、捕獲されて外部へ放出される(分波)。逆に、ドナー型クラスタ欠陥14において外部から特定の波長の光だけを導波路13に投入することもできる(合波)。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 a)スラブ状の本体と、

b)上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

c)上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、

d)上記導波路の近傍に設けられる、隣接する2個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、
を備えることを特徴とする2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項2】 上記クラスタ欠陥が、隣接する2個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項1に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項3】 上記クラスタ欠陥が、三角形状に隣接する3個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項1に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項4】 上記クラスタ欠陥が、導波路に平行な直線状に隣接する3個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項1に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項5】 直線状に隣接する3個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の4列目に設けられることを特徴とする請求項4に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項6】 a)スラブ状の本体と、

b)上記本体内に設けられた2以上の禁制帯領域と、

c)各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

d)各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、

e)各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、
を備えることを特徴とする2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項7】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも1つが、隣接する2個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項6に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項8】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも1つが、隣接する2個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項7に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項9】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも1つが、三角形状に隣接する3個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項7に記載の2次元フォトニック

結晶光分合波器。

【請求項10】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも1つが、導波路に平行な直線状に隣接する3個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項7に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項11】 直線状に隣接する3個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の4列目に設けられることを特徴とする請求項10に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項12】 上記異屈折率領域の欠陥は、本体の一方の面から本体の厚みの5%~40%の範囲の部分にのみ異屈折率領域を設けたものであることを特徴とする請求項1~11のいずれかに記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項13】 上記異屈折率領域の厚みが本体の厚みの20%~30%であることを特徴とする請求項12に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項14】 上記異屈折率領域が、本体よりも屈折率の低い領域であることを特徴とする請求項1~13のいずれかに記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項15】 上記低屈折率領域が空孔であることを特徴とする請求項14に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項16】 上記異屈折率領域の欠陥が、本体に空孔を設けないことにより形成されるドナー型欠陥であることを特徴とする請求項15に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項17】 上記異屈折率領域の欠陥が、上記空孔よりも径の大きい空孔を設けることにより形成されるアクセプタ型欠陥であることを特徴とする請求項15に記載の2次元フォトニック結晶光分合波器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長分割多重通信などに用いられる光分合波デバイスに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、新しい光デバイスとして、フォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光学機能材料であり、光子のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光の伝播が不可能となるエネルギー領域(フォトニックバンドギャップ)が形成されることが特徴である。

【0003】フォトニック結晶の適用が期待される分野の一例として、光通信の分野を取り上げる。光通信において、従来の光時分割多重方式(Optical Time Division Multiplexing: OTDM)に代わって、波長分割多重方式(Wavelength Division Multiplexing: WDM)が用いられている。このWDMは、一本の伝送路に複数の波長の光を

伝播させ、それぞれに別個の信号を乗せる通信方式である。これによって、単位時間に送信できる情報量が飛躍的に向上する。

【0004】この波長分割多重方式においては、伝送路の入口側で各波長の光を混合し、混合された光を出口側で各波長ごとに取り出す。そのために、光の合波器及び分波器、あるいは波長フィルタが必要となる。このうち分波器として、現状ではアレイ導波路回折格子(Arrayed Waveguide Grating : AWG)が用いられている。しかし、AWGでは通常の導波路を用いるので、光の損失を小さくするために、現状では数cm角程度の比較的大きな素子が用いられている。

【0005】そこで、フォトニック結晶から成るデバイスを上記分波器及び合波器として用いることにより、上記分波器の小型化を図ることが検討されている(例えば、特開2001-272555号公報に記載。以下、従来技術1とする。)。以下に、フォトニック結晶から成る分波器について簡単に述べる。フォトニック結晶中に適切な欠陥を導入することにより、上記フォトニックバンドギャップ中にこの欠陥によるエネルギー準位(欠陥準位)が形成される。これによって、上記フォトニックバンドギャップ中のエネルギーに対応する波長範囲のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが存在可能になる。結晶中の上記欠陥を線状にすれば光導波路となり、結晶中の欠陥を点状にすれば光共振器となる。

【0006】フォトニック結晶中に上記導波路を設け、その近傍に上記点欠陥を適切に設ければ、様々な波長の光が導波路内を伝播し、その内の、点欠陥の共振周波数に一致する波長の光のみが点欠陥に捕獲される。その光を取り出せば、所望の波長の分波器となる。逆に、共振周波数に一致する波長の光を点欠陥からフォトニック結晶内に導入し、他の様々な波長の光と一緒に導波路内を伝播させれば、所望の波長の合波器となる。

【0007】分波器及び合波器としてのフォトニック結晶には、2次元結晶あるいは3次元結晶を用いることができる。その両者にそれぞれ特長があるが、以下では、作成が比較的容易な2次元結晶について述べる。2次元フォトニック結晶では、面に直交する方向(面直方向)には結晶本体と空気との大きな屈折率の差があるので、光を面直方向に対して閉じこめることができる。

【0008】上記従来技術1において、InGaAsPから成るスラブに周期的に同じ直径の円柱孔を開け、その円柱孔の1列を塞ぐことで光導波路とし、さらに少なくとも1箇所の円柱孔の直径を他の円柱孔の直径と異なるものとする事で欠陥を導入して、それを光共振器とした場合について検討されている。

【0009】それによれば、伝播させたい光の波長(上記実施例では、波長分割光多重通信に一般的に用いられる波長帯のひとつである $1.55\mu\text{m}$)に合わせて格子定数 a を設定する。そして、各格子点に設けた円柱孔の半径を

$0.29a$ とする。そのうち1個の円柱孔の半径を $0.56a$ とすることにより、そこに点欠陥を形成する。すると、その点欠陥からスラブの面直上下方向に規格化周波数 $f=0.273$ の光が放射される。この時の Q 値はおおよそ500となる。ここで、規格化周波数とは、光の周波数に a/c (c は光速)を乗じて無次元としたものである。 Q 値は共振器の効率を示す値であり、 Q 値が大きいほど波長分解能も高くなる。また、1個の円柱孔の半径を $0.56a$ 、別の1個の円柱孔の半径を $0.58a$ と、大きさの異なる複数の点欠陥を形成した場合、それぞれ規格化周波数が 0.2729 及び 0.2769 と、波長の異なる2種の光が放射される。その時の Q 値はいずれもおおよそ500となる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上で述べたように、上記従来技術1において2次元フォトニック結晶を光分波器として使用できることが示されているが、そこで得られている性能について、以下の点でさらに向上させる必要がある。まず、 Q 値について述べる。上記従来技術1において Q 値はおおよそ500である。この値から、波長 λ の光における光共振器の波長分解能が λ/Q で求められる。例えば、 $1.55\mu\text{m}$ 帯の波長における上記光共振器の波長分解能は約 3nm となる。しかし、高密度波長分割多重方式の光通信に用いるためには、波長分解能をおおよそ 0.8nm 以下、 Q 値をおおよそ2000以上にしなければならない。従来技術1において Q 値を向上させることに対する障害要因として、点欠陥を導入することによって面直方向への光のエネルギーの損失が増大することが考えられる。

【0011】2次元面の片側の面からのみ光を取り出すために点欠陥に上下非対称性を導入することがある(従来技術1)。また、円形の点欠陥から取り出される光は無偏光であるが、外部の光学系と結合させることなどの目的により、直線偏光した光が求められることがある。そこで、偏光波を取り出すために点欠陥に面内方向の非対称性が導入されることがある。しかし、点欠陥の非対称性も Q 値が低下する原因となる。

【0012】本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは小型化が可能であり、かつ Q 値の高い、すなわち効率の高い光分合波器を得ることにある。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることも目的とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために成された本発明に係る2次元フォトニック結晶光分合波器の第1の態様のものは、

- a) スラブ状の本体と、
- b) 上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
- c) 上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、

d)上記導波路の近傍に設けられる、隣接する2個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、を備えることを特徴とする。

【0014】また、本発明に係る2次元フォトニック結晶光分合波器の第2の態様のものは、

a)スラブ状の本体と、

b)上記本体内に設けられた2以上の禁制帯領域と、

c)各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

d)各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、

e)各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、を備えることを特徴とする。

【0015】

【発明の実施の形態】まず、第1の態様について説明する。面内方向の大きさに比べて厚さが十分薄い板状体であるスラブが、本発明の2次元フォトニック結晶光分合波器の本体となる。この本体に、本体とは屈折率の異なる領域を周期的に配置する。この周期的な異屈折率領域の存在によりフォトニックバンドギャップが形成され、その範囲内のエネルギーを持つ光を存在させなくする。すなわち、それに対応する波長帯の光は本体を通過することができない。

【0016】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低いもの及び高いもののいずれであってもよい。一般に、本体としては屈折率の高い材質が用いられることが多いので、異屈折率領域としては屈折率の低い材質のものをを用いるのが材料選択の点からも容易である。

【0017】更に、低屈折率領域としては、本体よりも屈折率の低い物質を本体内に埋め込んだものでもよいし、単に本体に孔を開けただけのものでもよい。後者の場合は、空気が上記異屈折率領域となる。実際上、空気が最も屈折率の低い材質であるため、本体との屈折率差を大きくすることができるという点で有利である。また、製造上も、他の物質を埋め込むよりも単に空孔を設ける方が容易である。

【0018】以下、異屈折率領域が配置される周期的な点を格子点と呼ぶ。格子点の配列としては種々の形態が考えられるが、例えば正方格子状や三角格子状などが典型的なものである。

【0019】このような周期性を有するフォトニック結晶において、1個の格子点の異屈折率領域に欠陥を設けることにより、そこで周期性が乱される。欠陥のパラメータを適切に設定することにより、この周期性の乱れからフォトニックバンドギャップ中に欠陥準位が形成され、光の存在が許されない本体中に光の存在が許される点が生ずる。これを点欠陥と呼ぶ。このような欠陥を線状に設けることにより、本体中に光が通過し得る導波路

を形成することができる。これを線欠陥と呼ぶ。線欠陥の形状は直線状に限らず、屈曲状や曲線状であってもよい。また、線欠陥の幅は格子点の列の1列分であってもよいし、複数列分であってもよい。

【0020】上記のように、異屈折率領域を空孔とした場合、その欠陥としては、空孔を本体の物質で埋めたもの、すなわち、その格子点に空孔を設けないもの、が最も便利である。もちろん、その空孔の径を大きくしたものも欠陥となる。格子点に空孔を設けないものはドナー型欠陥であり、空孔の径を大きくしたものはアクセプタ型欠陥である。

【0021】ここで、ドナー型欠陥とアクセプタ型欠陥について説明する。本発明では赤外線及び紫外線を含む光を対象としているため、屈折率で説明しているが、一般的にはフォトニック結晶は周期的な誘電率の差により形成される。従って、欠陥は、本体中に周期的に配置された異誘電率領域(格子点)の1個の誘電率を異なるものとするにより形成される。誘電率を通常の格子点の誘電率よりも高い値にしたものをドナー型欠陥、低い値にしたものをアクセプタ型欠陥と呼ぶ。上記のように、何らかの物質で作製された本体中に周期的に空孔を配置し、その内の1点に空孔を設けない(本体物質で埋める)という欠陥は、その格子点の誘電率を空気よりも高くすることであるため、ドナー型欠陥である。逆に、1点の孔の径を大きくすることは、その格子点の誘電率を低くすることであるため、アクセプタ型欠陥である。

【0022】異屈折率領域のうち、導波路の近傍にある、隣接する2個以上の格子点を欠陥とすることによって、1個の格子点のみから成る欠陥とは異なる特性を持つ欠陥を形成する。以後、1個の格子点のみから成る欠陥を「点欠陥」と呼ぶ。従来技術1に記載されている欠陥は、この点欠陥である。それに対して、本願発明の第1の態様で使用する欠陥は、隣接する2個以上の格子点により形成される欠陥である。これを「クラスタ欠陥」と呼ぶ。また、「点欠陥」と「クラスタ欠陥」とを総称して「点状欠陥」と呼ぶ。これは、後述の第2の態様で使用する。

【0023】このような構成において、1個のクラスタ欠陥に含まれる格子点の個数や配列及びクラスタ欠陥の位置(導波路からの距離)、あるいは本体の格子定数 a などのパラメータを適切に設定することにより、クラスタ欠陥によりフォトニックバンドギャップ中に所望の欠陥準位が形成される。そして、導波路を通過する種々の波長の光のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが欠陥位置において共振する。共振した光はフォトニック結晶の面直方向に放出される。所望の波長の光を得るためには、上記種々のパラメータを調節することによって、欠陥準位のエネルギーを適切に選べばよい。

【0024】2個以上の欠陥を直線状に配置して形成したクラスタ欠陥の場合、欠陥位置においてクラスタ欠陥

の幅方向の偏光が得られる。

【0025】クラスタ欠陥の形状に面直方向の非対称性を与えれば、2次元フォトニック結晶の上下に出力される光の出力を非対称にすることができる。非対称性を与えるための方法としては、本体の一方の面から本体の厚みの一部分にのみ異屈折率領域を設けることにより、異屈折率領域の欠陥とする方法が考えられる。その厚みの範囲としては、後述のように、5%~40%、特に20~30%が望ましい。

【0026】クラスタ欠陥の場合、その形状に面直方向の非対称性を与えるには、上記のように各格子点における非対称性に依る必要はない。例えば、隣接する2つの格子点から成るクラスタ欠陥に対して、その2つの格子点の中間の一点に上記操作（一方の面にのみ低屈折率領域を設ける）を行ってもよい。

【0027】ここまでは分波器としての作用を述べたが、上記構成を合波器として用いることもできる。欠陥単位のエネルギーに対応する波長の光をクラスタ欠陥の位置に導入すれば、導波路を流れる光に上記波長の光が合波される。

【0028】格子点の個数や配列が異なる2個以上のクラスタ欠陥を配置することによって、異なる2種以上の波長の光を分合波することもできる。

【0029】次に、第2の態様について説明する。第1の態様において、欠陥を設ける格子点の個数や配置を変えることによって分合波する光の波長を変えることができることを示した。そして、異屈折率領域としては空孔が有利であり、欠陥としてはその空孔を設けないというドナー型欠陥が有利であることを述べた。しかし、このようなドナー型欠陥は、空孔の径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型欠陥よりも波長変化の自由度が少ない。これは、アクセプタ型欠陥では空孔の大きさを任意に変化させることができるのに対して、ドナー型欠陥は単に格子点を本体物質で埋めるだけであり、そのような変化の自由度がないためである。上記本発明の第1の態様に従ってドナー型欠陥をクラスタ型とすることにより、それに含まれる格子点の数又は配置の形態を変えるという自由度は生じるが、それでも自由度の幅は限られている。ドナー型クラスタ欠陥におけるこのような問題は、本発明の第2の態様によって解決される。それを以下に詳しく述べる。

【0030】本発明の第2の態様は、本体に異屈折率領域を配する際に、本体を、分合波する波長の種類の数と同じ数の領域に分ける。以後、この領域を禁制帯領域と呼ぶ。そして、各禁制帯領域毎に異なる配列周期で上記異屈折率領域を配置する。

【0031】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低い材質によって形成されることが好ましく、空気によって形成される（すなわち、空孔である）ことがより好ましいという点は、第1の態様と同様である。

【0032】各禁制帯領域を通して光を通過させ、合波するために、上記禁制帯領域の全てを通る導波路を第1の態様と同様に形成する。さらに、上記禁制帯領域の各々に分合波用の点状欠陥を形成する。「点状欠陥」とは上記の通り、1個の格子点のみから成る点欠陥と、複数の隣接する点欠陥で構成されるクラスタ欠陥とを含むものである。各禁制帯領域に設ける点状欠陥は、互いに共振波長が異なるようにしておく。従って、 n 個の禁制帯領域で構成される2次元フォトニック結晶光分合波器は、 n 種類の波長の光を分合波する。このように、1つの2次元フォトニック結晶に複数の禁制帯領域を設けた構造を、面内ヘテロ構造と呼ぶ。

【0033】各禁制帯領域における異屈折率領域の配列周期と点状欠陥は、分合波する光の波長に対応して設定する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率も、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期と同じ比率とする。各禁制帯領域に同じ形状のクラスタ欠陥を配置すれば、禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の違いによって、各クラスタ欠陥は異なる波長を分合波する。もちろん、禁制帯領域毎に異なる格子点数又は形状のクラスタ欠陥を配置してもよい。クラスタ欠陥には第1の態様の種々の欠陥が使用可能である。

【0034】本発明の第2の態様は、特に、本体の周期構造である空孔を設けないというドナー型欠陥の場合に自由度を大きくするという目的で開発されたものであるが、この構成自体はアクセプタ型にも適用することができる。それに特有の利点を持つ。すなわち、1個の格子点の空孔径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型点欠陥を用いて異なる2種以上の波長の光を分合波しようとする場合、従来は1枚の本体内に径の異なる複数の空孔を導入していたが、これによって Q 値が低下するという問題があった。この Q 値の低下を回避するために、本発明の第2の態様を好適に適用することができる。すなわち、異なる禁制帯領域に、分合波する光の波長に対応して異なる配列周期で異屈折率領域を配置する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率、及び各禁制帯領域毎に配置するアクセプタ型点欠陥の大きさも、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の比率と同じ比率とする。これにより、 Q 値の低下を招くことなく、複数の波長の光を分合波することが可能となる。

【0035】

【発明の効果】上記第1の態様のクラスタ欠陥を導入することによって、1個の格子点のみから成る点欠陥を用いる場合よりも高い Q 値を持つ分波器及び合波器を得ることができる。これは、クラスタ欠陥が形成されることにより、欠陥の周囲における有効屈折率が高くなり、光の閉じこめ効果が向上することによる。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることができる。

【0036】上記第2の態様の面内ヘテロ構造を導入することによって、ドナー型クラスタ欠陥を使用した場合においても、複数の波長の光を分合波する際の各波長を高い自由度で設定することができる。また、そのときのQ値は、1種類の波長の光を分合波するフォトニック結晶のQ値とほとんど変わらない。高いQ値を持つ第1の態様のドナー型クラスタ欠陥を用いて第2の態様を構成すれば、高いQ値を持ち、かつ光の波長を分合波する装置を比較的容易に作製することができる。また、第2の態様はアクセプタ型欠陥に対しても有効に適用することができる。

【0037】

【実施例】(1)第1の態様の実施例

(1-1)構成

まず、第1の態様の実施例として、図1に模式的に示すような2次元フォトニック結晶を取り上げる。図1に板状に表したものがスラブ(本体)11である。光通信に用いる波長 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の赤外線考えた場合、スラブ11にはそれに対して透明なInGaAsPを用いることができる。そこに、白丸で示すように、異屈折率領域(低屈折率領域)である空孔12を周期的に配置する。図1では三角格子状に空孔12を配した例を示しているが、その他にも正方格子状などの様々な配置が考えられる。

【0038】導波路13は、図1の実線の矢印で示した部分において空孔を線状に連続的に設けないことにより形成される。さらに白矢印で示した部分において複数の格子点に空孔を設けないことによって、ドナー型クラスタ欠陥14が形成される。図のうえでは、空孔で構成される格子点を本体物質で埋めたように表されるので、以

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] + \frac{\omega^2}{c^2} H_z = 0 \quad (1)$$

と表される。ここで ω は光の角振動数、 $H_z = H_z(x, y, \omega)$ は面内におけるz方向の磁界(H_x, H_y は0)、 c は光速である。また、 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ はここでは周期的な誘電率を表す。 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ をフーリエ級数展開し、 $H_z(x, y, \omega)$ をプロッホ

$$\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}) \exp\{j\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}\}$$

$$H_z(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \exp\{j(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}\} \quad (2)$$

となる。ただし、 \mathbf{k} は波数ベクトルであり、 \mathbf{G} は逆格子ベクトルである。また、 $\kappa(\mathbf{G})$ 及び $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ はそれぞれ展開係数である。式(2)を式(1)に代入し、任意の \mathbf{G} に対する h

$$\sum_{\mathbf{G}'} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \kappa(\mathbf{G} - \mathbf{G}') h(\mathbf{k}, \mathbf{G}') = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \quad (3)$$

となる。したがって、特定の波数ベクトル \mathbf{k} を与えると固有値として $(\omega/c)^2$ が求められ、対応する周波数、すなわち対応するエネルギーが定まる。様々な波数ベクトル

下では、ドナー型クラスタ欠陥を構成することを「格子点を埋める」と表現することがある。

【0039】図1においては3格子点を埋めたドナー型クラスタ欠陥の例を示したが、その他にも、図2に示すような様々なドナー型クラスタ欠陥の構成が考えられる。図2には、格子点を2~3個埋めた場合の構成を示した。図には示さないが、4格子点以上を埋めたドナー型クラスタ欠陥も可能である。格子点を3個埋めた場合については3通りの構成を示している。このうち、欠陥を構成する3つの格子点が三角形に並ぶものを「三角形状欠陥」、直線上に並ぶものを「直線状欠陥」と呼ぶことにする。なお、図2には比較のために格子点1個だけで構成されるドナー型欠陥(ドナー型点欠陥)も示した。

【0040】(1-2)光分合波できることの確認

上記構成によって実際に光を分合波できるかどうかを確認する。そのためにまず、導波路が通すフォトニックバンドギャップ中の光の波長帯を調べ、次にその光の波長帯の中にドナー型欠陥によって欠陥準位が形成されるかどうかを調べる。その手段として、2次元平面波展開法と呼ばれる解析手法を用いた。

【0041】平面波展開法とは、誘電率分布が周期構造をもつ空間を伝播する光を、平面波の合成として表す方法である。電界が面内方向に振動し磁界が面直方向に振動するTEモードを考えると、電磁気のマクスウェル方程式は磁界について、

【0042】

【数1】

の定理により展開すると、それぞれ、

【0043】

【数2】

(\mathbf{k}, \mathbf{G})について解くと、

【0044】

【数3】

ル \mathbf{k} に対応する周波数 ω を求めることで、フォトニックバンド構造が計算される。

【0045】式(3)を用いて、まず導波路を有し点欠陥

を持たない2次元フォトニック結晶に対して、TEモードについて導波路を伝播する周波数領域を計算した結果を図3に示す。なお、図3の右図は左図の一部を拡大したものである。図3より、0次モード(図中の黒丸)と1次モード(同白丸)の2つの導波モードが伝播可能であるが、単一モードであること及び外部の系との兼ね合いから、0次モードの方が効率が良いと考えられる。また、図中に「ライトライン」と記された実線よりも高周波側の光は、自由空間に存在する同じ周波数で同じ面内波数をもつモードに結合して上下方向に漏れ出してしまい、伝播効率が低下する。以上より、図3の右図に黒丸と細実線で示した、規格化周波数0.267~0.280の範囲の光が最も効率よく当該導波路を伝播すると考えられる。言い換えれば、所望の光の周波数が規格化周波数0.267~0.280の範囲に入るように格子定数 a を決定すればよい。例えば、本体の材質としてInGaAsPを使用し、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光を用いるものとして計算した場合、上記規格化周波数の範囲から格子定数 a を $0.42\sim 0.43\mu\text{m}$ とすればよいことがわかる。

【0046】図2に示した欠陥のうち、格子点を2個埋めたものと、三角形状及び直線状に3個埋めたクラスタ欠陥について、それぞれ欠陥準位を計算した。また、比較のために格子点を1個だけ埋めたドナー型点欠陥についても計算を行った。それらの結果を図4~図7に示す。まず、比較例であるドナー型点欠陥の場合は、図4のように、上記の導波路を伝播する周波数領域 $0.267c/a\sim 0.280c/a$ (以後、利用可能周波数域と称する)の間に欠陥準位が形成されないで、分合波器としては用いることができない。

【0047】それに対して、隣接する2個の格子点を埋めたクラスタ欠陥の場合は、図5のように利用可能周波数域に欠陥準位が1つだけ形成されるので、分合波器として用いることができる。3個の格子点を三角形状に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図6のように利用可能周波数域に欠陥準位が複数形成されるが、そのうち規格化周波数0.268付近にある欠陥準位は単一であり、かつそれより高周波側の欠陥準位との間隔が十分離れているので、分合波器として用いることができる。3個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図7のように利用可能な周波数域に欠陥準位が1つだけ形成されるので、分合波器として用いることができる。

【0048】上記において分合波器として用いることができることが明らかになった、隣接する2個の格子点を埋めた場合、3個の格子点を三角形状に埋めた場合および3個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めた場合について、電磁界分布を計算した結果を図8及び図9に示す。この図において、矢印は図面に平行な方向の電界ベクトルを示し、色の濃淡は図面に垂直な方向の磁界の振幅を示している。2個の格子点を埋めた場合及び3個の

格子点を直線状に埋めた場合には、当該欠陥において共振する光は、埋めた格子点列に伝播するようなモードである。また、埋めた格子点列に垂直な方向の電界が強く、直線偏光に近い特性を持つと考えられる。一方、3個の格子点を三角形状に埋めた場合には、三角形の重心から各頂点に向かって伝播するような共振モードを示しており、電磁界分布の対称性が高く、偏光性が上記2つの場合ほどは大きくないと考えられる。

【0049】(1-3)Q値の算出

次に、前段落で取り上げた3つの場合について、Q値の計算を行った。その際、Yeeのアルゴリズムによる時間領域差分法(K.S.Yee, "IEEE Trans. Antennas Propagat.", AP-14巻 302-307ページ)を用い、放射される電磁波の強度について欠陥準位付近における周波数依存性を計算し、そのピーク強度と半値全幅からQ値を求めた。

【0050】2次元フォトニック結晶におけるQ値は、点欠陥と導波路との結合を表す Q_p と、点欠陥と外部(面外)との結合を表す Q_s で決まる。このうち Q_p は点欠陥と導波路との距離によって決まる。そこで、点欠陥の種類によるQ値の違いを調べるために、まず点欠陥と導波路との距離を無限大と仮定し、 Q_s について計算した。その結果、2個の格子点を埋めた場合は $Q_s=1354$ 、3個の格子点を三角形状に埋めた場合は $Q_s=2529$ 、3個の格子点を直線状に埋めた場合は $Q_s=5215$ となった。一方、従来技術1のアクセプタ型点欠陥について同様に Q_s を求めると924であった。

【0051】この結果、ドナー型クラスタ欠陥のQ値がアクセプタ型点欠陥のそれよりも向上することが期待され、その中でも特に3個の格子点を直線状に埋めた場合がもっともQ値が高くなると期待される。そこで、3個の格子点を直線状に埋めた場合について、 Q_s 及び Q_p の、点欠陥-導波路間の距離依存性を求めた結果を図10に示す。ここで図10の横軸は、空孔の列の数を単位として、格子点を直線状に埋めた列と導波路との距離を表している。Q値は Q_s と Q_p を用いて $1/Q=1/Q_s+1/Q_p$ で求められるので、図10からQ値は図11のように求められる。Q値は2012~4666となり、いずれも従来技術1のQ値~500よりも大幅に向上している。

【0052】図11によれば、点欠陥と導波路との距離が増大するにつれてQ値は大きくなる。しかし、その距離が大きくなりすぎると、分波器の場合は点欠陥に到達する光が減少し、合波器の場合は導波路に到達する光が減少するので、分合波器としては不都合である。そこで上記距離は、Q値と点欠陥-導波路間の光のやりとりとの兼ね合いを考慮して、適切に選ぶ必要がある。最も効率がよいと考えられるのが、 $Q_p=Q_s$ のときである。図12より、この条件に最も近いのは、点欠陥が、導波路から空孔列の数で4列目にある場合である。

【0053】前段落においては分合波器としての効率を考えたが、意図的に Q_p を大きく、 Q_s を小さくすれば、導

波路を流れる特定の波長の光をわずかに取り出してモニターする、波長検出デバイスとして用いることもできる。

【0054】(1-4)偏光特性

(1-2)で述べたように、2個の格子点を埋めた場合及び3個の格子点を直線状に埋めた場合には、放出光の直線偏光性が高いことが期待される。そこで、3個の格子点を直線状に埋めた場合について放出光の偏光特性を計算した。その結果を図13に示す。図13の横軸は埋められた格子点の列に対する面内方向の角度であり、縦軸はその角度における光の振幅に対応する。上記角度が 0° の方向では振幅がほとんど0になり、上記角度が 90° の方向で振幅が最大になる。すなわち、埋められた格子点の列に垂直な方向に強く偏光していることがわかる。

【0055】(1-5)ドナー型クラスタ欠陥における上下出力割合の制御

以上においては、点欠陥は面直方向に上下対称とした。すなわち、一格子点における低屈折率の物質を全て埋めた場合を考えた。この場合、面の上下方向共に、点欠陥から光が放出される。

【0056】ここでは、ドナー型クラスタ欠陥の形状に図14のような上下非対称性を入れた場合について計算した。図14の例は、本体の厚さを $0.6a$ とし、3個の格子点を直線状に埋め、埋められた各格子点の中間(2箇所)に半径 $r=0.29a$ 、深さ $h(<0.6a)$ の孔を開けたものである。深さを格子定数で規格化した h/a と上下出力比の関係についての計算結果を図15に示す。この図に示した h/a の範囲($0.05\sim 0.4$)において、欠陥の上下の出力に非対称性が見られる。特に、 h/a が $0.2\sim 0.4$ の範囲で約2倍強の上下出力比が得られていることが分かる。また、 h/a と Q 値の関係を図16に示す。上下出力比が大きい領域で Q 値の低下が見られるが、それでも従来技術1よりも高い Q 値が得られた。

【0057】(2)第2の態様の実施例

第2の態様の実施例として、面内ヘテロ構造の構成例を図17に示す。この図は2つの禁制帯領域から成る面内ヘテロ構造を表している。図中央の一点鎖線を境に、空孔(低屈折率物質)の配列周期が a_1 である結晶と同周期が a_2 である結晶が接合されて構成されている。以下、配列周期が a_1 の禁制帯領域を第1禁制帯領域、配列周期が a_2 の禁制帯領域を第2禁制帯領域と呼ぶ。第1禁制帯領域における空孔の直径を b_1 、第2禁制帯領域における空孔の直径を b_2 とする。一点鎖線の両側の導波路が同じ直線上に揃えられる。第1禁制帯領域及び第2禁制帯領域に同じ形状のドナー型クラスタ欠陥を形成する。以上の構成において、 a_1/a_2 と b_1/b_2 を等しくする。ドナー型クラスタ欠陥の大きさは空孔の配列周期によって決まるので、第1禁制帯領域のドナー型クラスタ欠陥の大きさと第2禁制帯領域ドナー型クラスタ欠陥のドナー型クラスタ欠陥の大きさの比も a_1/a_2 と等しい。

【0058】なお、ここではドナー型クラスタ欠陥の例

を示したが、点欠陥は図18に示すようなアクセプタ型点欠陥でもよい。この場合、第1禁制帯領域に直径 c_1 の1個のアクセプタ型点欠陥、第2禁制帯領域に直径 c_2 の1個のアクセプタ型点欠陥を設ける。 a_1/a_2 、 b_1/b_2 、 c_1/c_2 は全て等しくする。

【0059】図17および図18の構造について、 a_1 と a_2 が等しい場合、 a_1 が a_2 よりも1%大きい場合及び a_1 が a_2 よりも1%小さい場合について Q 値を計算した。ここで $\pm 1\%$ 、計2%の構造の違いは、 $1.55\mu\text{m}$ 帯において30nmの共鳴波長の違いに相当する。本計算においては、 $b_1=0.29a_1$ 、 $b_2=0.29a_2$ 、 $c_1=0.54a_1$ 、 $c_2=0.54a_2$ とした。 Q 値の計算結果を図19に示す。図17および図18では、 $(1-a_2/a_1)$ を構造変化率と定義して用いた。ドナー型クラスタ欠陥を用いた場合は、 Q 値が2885~2891となり、十分な大きな値が得られている。アクセプタ型点欠陥を用いた場合は、従来技術1のアクセプタ型の2次元フォトニック結晶の Q 値と同程度の値が得られた。構造の違いによる大きな Q 値の低下は見られない。

【0060】(3)本発明第1及び第2の態様の2次元フォトニック結晶の製造方法の例

2次元フォトニック結晶の製造方法については、上記従来技術1に関して、低屈折率物質として空気を用いる場合の製造方法が特開2001-272555号公報の[0037]~[0044]に開示されている。まず、その方法を簡単に説明する(詳細は上記公報を参照)。基板上に本体となるスラブの材質の結晶を成長させ、スラブを形成する。目的とする光の波長帯が $1.55\mu\text{m}$ 帯の場合は、例えばInGaAsPをスラブの材質に用いることができる。スラブの面上にフォトリソを塗布し電子線を照射することにより、低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥に対応するパターンを描画する。その面をガスエッチングすることによって低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥が形成される。

【0061】本発明の第1の態様の2次元フォトニック結晶を製造する場合には、上記製造方法において、パターンを描画する際にドナー型クラスタ欠陥を配置する個所に電子線を照射しないことによって、ドナー型クラスタ欠陥を導入する。また、本発明の第2の態様の面内ヘテロ構造を導入する場合にも、それに対応したパターンを描画すればよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の態様である、ドナー型クラスタ欠陥を持つ2次元フォトニック結晶の模式図。

【図2】 ドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図3】 導波路を導波する光の周波数帯を示す図。

【図4】 格子点を1個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図5】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図6】 格子点を三角形に3個埋めたドナー型クラ

スタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図7】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図8】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図9】 格子点を3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図10】 欠陥位置と Q_p 及び Q_s の関係を示すグラフ。

【図11】 欠陥位置と Q 値との関係を示す表。

【図12】 欠陥位置と Q_p/Q_s の関係を示すグラフ。

【図13】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の偏光特性を示すグラフ。

【図14】 上下非対称なドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図15】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と光の上下

出力比の関係を示すグラフ。

【図16】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と共振器の Q 値の関係を示すグラフ。

【図17】 アクセプタ型点欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図18】 ドナー型クラスタ欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図19】 面内ヘテロ構造と Q 値との関係を示す表。

【符号の説明】

11…本体

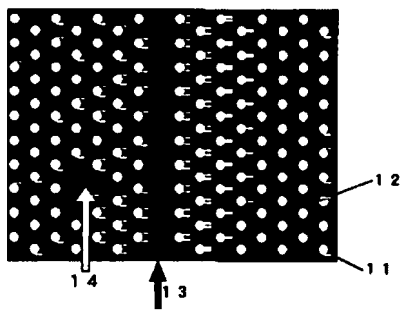
12…空孔

13…導波路

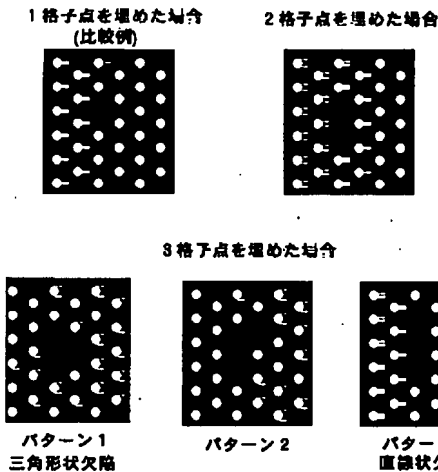
14…ドナー型クラスタ欠陥

15…アクセプタ型点欠陥

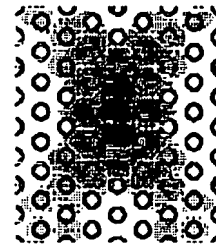
【図1】



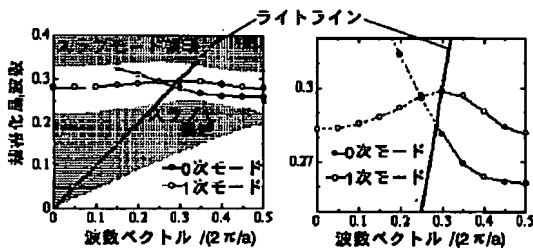
【図2】



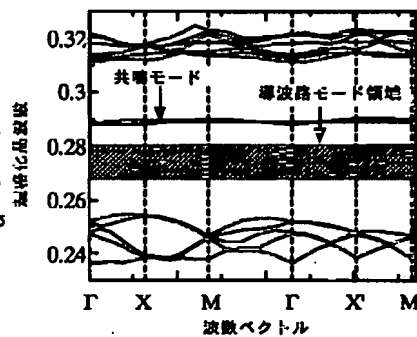
【図8】



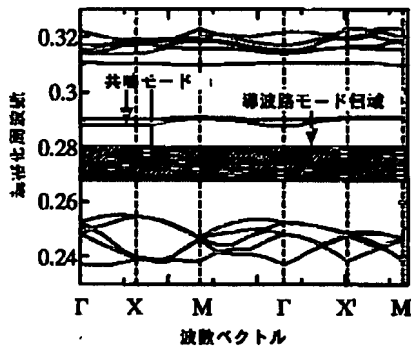
【図3】



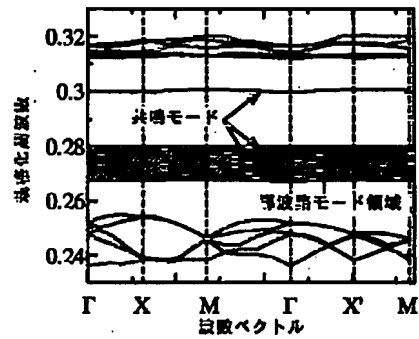
【図4】



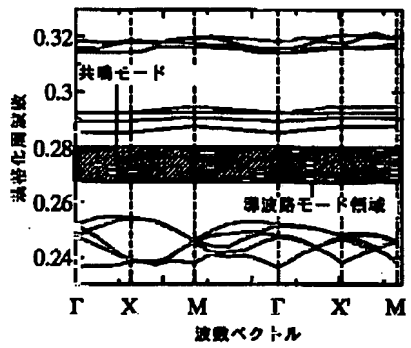
【図5】



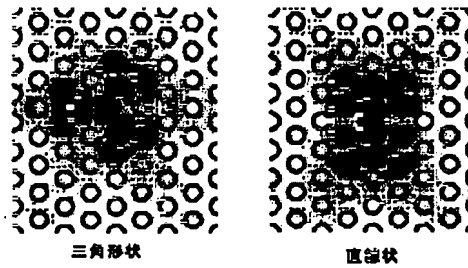
【図6】



【図7】

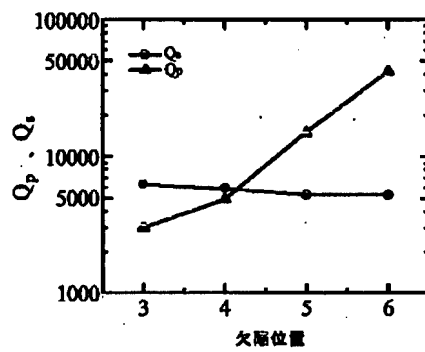


【図9】



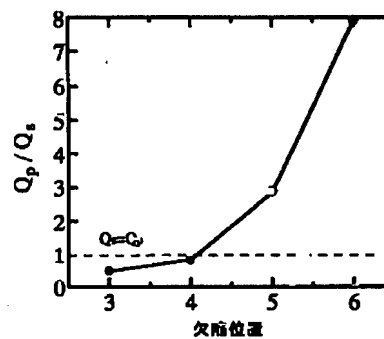
【図11】

【図10】

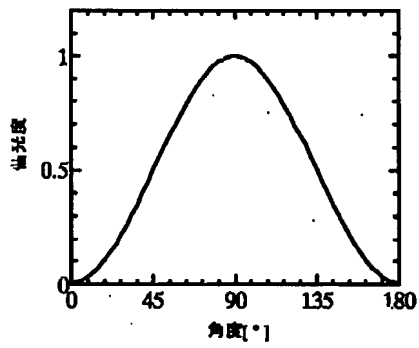


欠陥の位置	共振周波数	Q
3 列目	0.26790	2012
4 列目	0.26745	2651
5 列目	0.26735	3885
6 列目	0.26733	4666

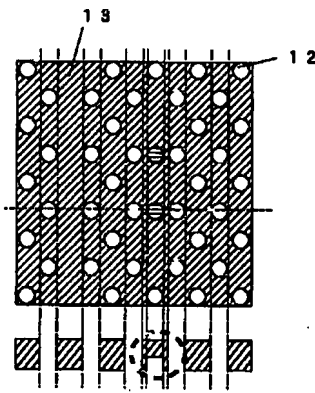
【図12】



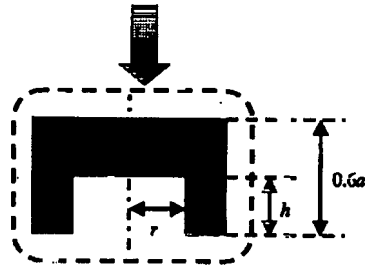
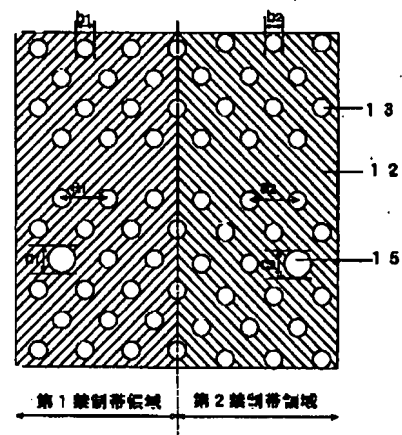
【图13】



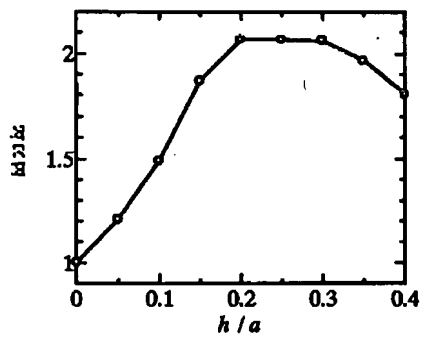
【图14】



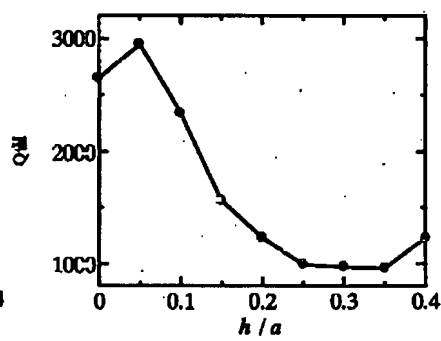
【图18】



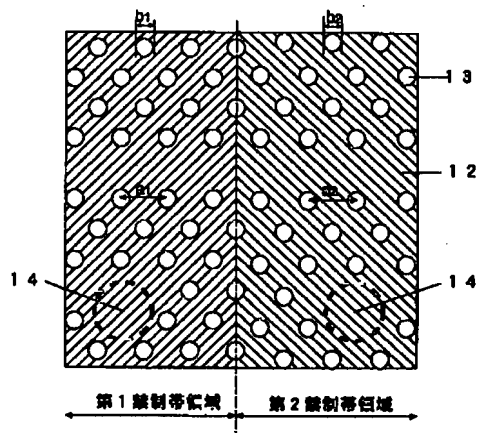
【图15】



【图16】



【図17】



【図19】

ドナー型クラスタ欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	Q_v	Q_p	Q_p/Q_v
-1%	$0.266649c/a_2$ (+0.69%)	2891	5039	6784	1.34
0%(参考)	$0.2675c/a_1$	2651	5769	4904	0.85
1%	$0.26849c/a_2$ (-0.62%)	2885	5206	6474	1.24

アクセプタ型点欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	Q_v	Q_p	Q_p/Q_v
-1%	$0.2719c/a_2=0.27462c/a_1$	470	975	906	0.93
0%(参考)	$0.2728c/a_1$	482	1040	899	0.86
1%	$0.2738c/a_2=0.27101c/a_1$	484	958	978	1.02

【手続補正書】

【提出日】平成14年7月18日(2002. 7. 18)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図面の簡単な説明

【補正方法】変更

【補正内容】

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の態様である、ドナー型クラスタ欠陥を持つ2次元フォトニック結晶の模式図。

【図2】 ドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図3】 導波路を導波する光の周波数帯を示す図。

【図4】 格子点を1個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図5】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図6】 格子点を三角形に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図7】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図8】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図9】 格子点を3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の

周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図10】 欠陥位置と Q_p 及び Q_s の関係を示すグラフ。

【図11】 欠陥位置と Q 値との関係を示す表。

【図12】 欠陥位置と Q_p/Q_s の関係を示すグラフ。

【図13】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の偏光特性を示すグラフ。

【図14】 上下非対称なドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図15】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と光の上下出力比の関係を示すグラフ。

【図16】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と共振器の Q 値の関係を示すグラフ。

【図17】 ドナー型クラスタ欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図18】 アクセプタ型点欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図19】 面内ヘテロ構造と Q 値との関係を示す表。

【符号の説明】

11…本体

12…空孔

13…導波路

14…ドナー型クラスタ欠陥

15…アクセプタ型点欠陥

フロントページの続き

(72)発明者 浅野 卓
京都市山科区安朱東海道町16の1 緑山荘
A-207

Fターム(参考) 2H047 KA02 KB08 LA18 PA02 PA15
PA24 QA02 RA08



(12) **EUROPEAN PATENT APPLICATION**

(43) Date of publication:
03.05.2000 Bulletin 2000/18

(51) Int. Cl.⁷: **G02B 6/293**, G02B 5/20,
H04B 10/18, H04L 25/03

(21) Application number: 99308189.2

(22) Date of filing: 18.10.1999

(84) Designated Contracting States:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE
Designated Extension States:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priority: 30.10.1998 US 182980

(71) Applicant:
LUCENT TECHNOLOGIES INC.
Murray Hill, New Jersey 07974-0636 (US)

(72) Inventors:
• Kazarinov, Rudolf Feodor
Bethlehem, Pennsylvania 18017 (US)

• Lenz, Gadi
Fanwood, New Jersey 07023 (US)
• Madsen, Christi Kay
South Plainfield, New Jersey 07080 (US)
• Scotti, Ronald Edward
White House Station, New Jersey 08889 (US)

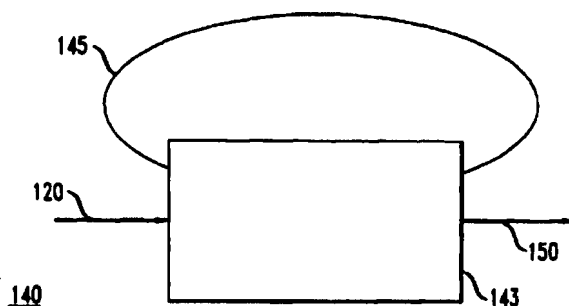
(74) Representative:
Johnston, Kenneth Graham et al
Lucent Technologies (UK) Ltd,
5 Mornington Road
Woodford Green Essex, IG8 OTU (GB)

(54) **All-pass optical filter**

(57) An all-pass optical filter which reduces the dispersion of optical pulses transmitted therethrough is disclosed. The all-pass optical filter reduces the dispersion of optical pulses by applying a desired phase response to optical pulses transmitted therethrough. The all-pass

optical filter also has a frequency independent amplitude response. The all-pass optical filter has a structure which includes at least one feedback path, a splitter/combiner, an input port, and an output port.

FIG. 4 A



Description

1. Field of the Invention

- 5 [0001] The present invention relates generally to optical communication systems, and more particularly, to optical filters.

2. Description of the Related Art

- 10 [0002] Optical communication systems typically include a variety of devices (e. g., light sources, photodetectors, switches, optical fibers, modulators, amplifiers, and filters). For example, in the optical communication system 1 shown in FIG. 1, a light source 2 generates an optical signal 3. The optical signal 3 comprises a series of light pulses. The light pulses are transmitted from the light source 2 to a detector 5. Typically, an optical fiber 4 transmits the light pulses from the light source 2 to the detector 5. The optical fiber 4 has amplifiers (not shown) and filters (not shown) positioned
15 along its length. The amplifiers and filters propagate the light pulses along the length of the optical fiber 4 from the light source 2 to the detector 5.

[0003] Optical communication systems are useful for transmitting optical signals over long distances at high speeds. For example, optical signals are routinely transmitted distances greater than about 60 kilometers at transmission speeds exceeding 1 Gbit/s (Gigabit/second).

- 20 [0004] As shown on the graph of FIG. 2A, an optical pulse 10 typically comprises a packet of waves, wherein each wave in the packet, denoted as 15, is within a frequency bandwidth of Δf . Additionally, each wave 15 in the packet is characterized by a plurality of different frequencies as well as a plurality of different amplitudes. An optical device or component (e. g., amplifiers, filters, and fibers) has an amplitude response and a phase response. The amplitude response describes the attenuation of each frequency in the optical pulse after transmission through the optical device
25 relative to their attenuation before transmission through the optical device. The phase response determines the time delay, denoted as 17, for each frequency 15 in the packet of waves.

- [0005] Many optical devices or components used for transmitting optical pulses apply a nonlinear phase response to the optical pulse. The nonlinear phase response changes the separation time between each frequency 15 of the packet of waves, causing each frequency 15 to be delayed for a different length of time. When each frequency 15 of the packet of waves is delayed for a different length of time, the optical pulse 10 output from such device or component is broadened and/or distorted, as shown on the graph of
30 FIG. 2B. Broadening the optical pulse is undesirable because, depending on the time between optical pulses, the leading and trailing edges of the broadened pulse, denoted as 25, potentially interfere with the trailing edge of a previous optical pulse or the leading edge of a subsequent optical pulse, causing transmission errors. Devices or components in optical communication systems which broaden optical pulses are termed dispersive devices.

- [0006] The dispersion of optical signals caused by the dispersive devices can be reduced with a dispersion compensating element. The term dispersion as used in this disclosure refers to the first and higher order derivatives of the group delay that are applied to the optical signal. The term group delay refers to the slope of the phase response at each frequency in the packet of waves. The dispersion compensating element applies a second dispersion to the optical
40 signal which is the negative of the dispersion that was caused by the dispersive device. The second dispersion is additive with the dispersion applied by the dispersive device, so the net dispersion of the optical signal is about zero.

- [0007] Dispersion compensating fibers and chirped fiber Bragg gratings are examples of fiber dispersion compensating elements. However, dispersion compensating fibers are lossy (~5-10 dB). Lossy fibers are undesirable because they potentially reduce the optical power of signals transmitted along their length. Many chirped fiber Bragg gratings
45 typically only compensate for quadratic dispersion, limiting their utility to systems with quadratic dispersion. Also, chirped fiber Bragg gratings require a circulator for separating dispersion compensated optical signals from non-compensated optical signals. Additionally, chirped fiber Bragg gratings are long devices, making them expensive to integrate into optical communication systems.

- [0008] Another dispersion compensating element, a dispersion equalizer, is described in Takiguchi, et al., "Variable Group-Delay Dispersion Equalizer Using Lattice-Form Programmable Optical Filter on Planar Lightwave Circuit", *IEEE J. of Quant. Elect.*, Vol. 2, No. 2, June 1996, pp. 270-276. The Takiguchi et al. dispersion equalizer is a filter which includes $i + 1$ symmetrical Mach-Zehnder interferometers (MZIs) interleaved with i asymmetrical MZIs, where i is an integer. The term "symmetrical" as used in this disclosure means that the lengths of the two waveguide arms of the MZIs are the same, while the term "asymmetrical" means that the lengths of the two waveguide arms are different.
55 While the Takiguchi et al. dispersion equalizers compensate for dispersion, the amplitude and phase responses are not independent. The result is that a frequency-dependent loss, introduced by the filter, potentially reduces the useable pass-band width of the filter. Additionally, the Takiguchi et al. dispersion equalizer is expensive and difficult to fabricate since a large number of symmetrical MZIs and asymmetrical MZIs are needed for dispersion compensation.

[0009] Moslehi et al. (U. S. Patent 4,768,850) also describes a dispersion compensating filter. The dispersion compensating filter is a cascaded fiber optic lattice filter. The cascaded fiber optic filter uses a cascade of recursive and non-recursive fiber optic lattice filters to compensate for dispersion. However, the single-stage cascaded fiber optic lattice filters of Moslehi et al. are lossy (~20 dB). Since the Moslehi et al. devices are lossy, signal amplification is required for providing optical signals having adequate signal strengths for transmission along the optical fiber.

[0010] Dilwali, S. et al., "Pulse Response of a Fiber Dispersion Equalizing Scheme Based on an Optical Resonator", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 4, No. 8, pp 942-944 (1992) proposes the use of a single-stage fiber ring structure as a dispersion equalizer in optical fibers. However, dispersion compensation using a single stage fiber ring structure affects the useable pass-band of the filter, reducing it.

[0011] Li, K. D. et al., "Broadband Cubic-Phase Compensation with Resonant Gires-Tournois Interferometers", Optics Lett., Vol. 14, No. 9, pp 450-452 (May 1989) discloses the use of Gires-Tournois interferometers (GTIs) for the dispersion compensation of ultrashort laser pulses. Each GTI includes two reflectors which are separated one from the other by a fixed distance. One reflector has a reflectivity of 100 % and the other reflector has a reflectivity less than 100 %. However, the GTI arrangement only provides moderate dispersion compensation to the ultrashort laser pulses, limiting the ability for transmitting optical signals at high bit rates.

[0012] Additionally, optical filters which apply time delays are useful for synchronizing bit streams of optical signals. For example, optical communication systems utilizing time division multiplexed (TDM) techniques (see Hall, K. L. et al., "All-Optical Storage of a 1.25 kbit Packet at 10 Gb/s", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 7, No. 9, pp. 1093-1095 (September 1995), require the synchronization of bit streams of optical signals to delay the propagation of some optical signals in time.

Summary of the Invention

[0013] The present invention is directed to an all-pass optical filter. The all-pass optical filter reduces the dispersion of optical pulses transmitted therethrough. The all-pass optical filter reduces the dispersion of optical pulses by applying a desired phase response to optical pulses transmitted therethrough.

[0014] The desired phase response applies a frequency-dependent time delay to each frequency of each wave in the packet of waves contained in the optical pulse. Application of the frequency-dependent time delay to each frequency of each wave in the packet of waves contained in the optical pulse causes the total group delay of pulses transmitted through the all-pass optical filter to approximate a constant value. When the total group delay approximates a constant value, the dispersion of the optical pulse (first and higher order derivatives of the group delay) reduces to about zero.

[0015] The all-pass optical filter of the present invention also has a frequency independent amplitude response. That is, the amplitude of each frequency of the optical pulse transmitted through the all-pass optical filter is substantially preserved.

[0016] The all-pass optical filter of the present invention has a structure which includes at least one feedback path, a splitter/combiner, an input port, and an output port. The splitter/combiner is coupled to at least one of the feedback paths, the input port, and the output port. The splitter/combiner determines what portion of an input optical pulse is provided to the at least one feedback paths. Thereafter, the at least one feedback path applies the desired phase response to the optical pulses transmitted through the all-pass optical filter.

[0017] Each of the at least one feedback paths forms a loop having a path length. The path lengths of each feedback path are optionally different. Feedback paths with different path lengths are desirable because they potentially increase the free spectral range (FSR) of the all-pass optical filter. The term FSR as used in this disclosure refers to the period over which the phase response of the optical pulse repeats.

[0018] In one embodiment of the present invention, the feedback path of the all-pass optical filter has a ring resonator structure. The ring resonator structure includes one or more ring resonators where each of the ring resonators is a closed loop. The one or more ring resonators are optionally arranged as a ring cascade or as a series of coupled rings. The ring cascade couples a first ring resonator with a splitter/combiner and then the remaining ring resonators are coupled one to another. For the series of coupled rings, each ring is independently coupled to a splitter/combiner.

[0019] In an alternate embodiment of the present invention, the at least one feedback path of the all-pass optical filter includes a cavity and a plurality of reflectors. At least one reflector of the plurality of reflectors has a reflectivity of about 100 %, while the remaining reflectors are partial reflectors with reflectivities less than 100 %. Twice the length of the cavity determines the path length of the feedback path. The partial reflectors perform the functions of the splitter/combiner.

[0020] Another embodiment of the present invention uses a photonic band gap (PBG) structure as the feedback path of the all-pass optical filter. The photonic band gap (PBG) structure includes periodic layers of a material which confine a range of frequencies within such periodic layers. Defects formed in a 2-dimensional array of such layers (2-D PBG) provides a guided feedback path for optical pulses propagated therein. Point defects optionally formed at the edges of the 2-D PBG structure perform the functions of the splitter/combiner, coupling optical signals into and away

from such feedback path.

[0021] A plurality of all-pass optical filters of the present invention are suited for use in an optical communication system. The plurality of all-pass optical filters are optionally arranged as a concatenated series.

[0022] The all-pass optical filter of the present invention is optionally suitable for delaying the transmission of optical pulses in time. The all-pass optical filter delays the transmission of optical signals by lengthening the time for optical pulses to be transmitted therethrough.

[0023] Other objects and features of the present invention will become apparent from the following detailed description considered in conjunction with the accompanying drawings. It is to be understood, however, that the drawings are designed solely for purposes of illustration and do not serve to limit the invention, for which reference should be made to the appended claims.

Brief Description of the Drawings

[0024]

FIG. 1 shows an optical communication system including a light source, an optical filter, and a detector;
FIG. 2A is a graph of an optical pulse comprising a packet of frequencies, wherein each frequency in the packet is within a frequency bandwidth of Δf ;

FIG. 2B shows a graph of the optical pulse of FIG. 2A after its propagation through a dispersive device;

FIG. 3 shows an optical communication system including an all-pass optical filter of the present invention;

FIG. 4A shows an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention including at least one feedback path, an input port, and an output port;

FIG. 4B shows an alternate embodiment of the all-pass optical filter of FIG. 4A including a plurality of feedback paths wherein one or more of the plurality of feedback paths includes an all-pass optical filter

FIG. 5 is a plot showing the frequency dependent time delay applied by the feedback path of the all-pass optical filter to the packet of frequencies contained in the optical pulse;

FIG. 6A illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path includes a series of coupled rings;

FIG. 6B illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path has a ring cascade structure;

FIG. 7A illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path combines a cavity with a plurality of reflectors, wherein at least one reflector has a reflectivity of about 100 %;

FIG. 7B illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path includes a plurality of cavities and a plurality of reflectors;

FIG. 8 illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path includes a photonic band gap (PBG) structure;

FIG. 9A illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path has a Mach-Zehnder Interferometer structure with waveguide arms having different lengths;

FIG. 9B illustrates an embodiment of the all-pass optical filter of the present invention wherein the feedback path has a Mach-Zehnder Interferometer structure with crossed waveguide arms that have about the same lengths;

FIG. 10A is a graph showing the group delay of an elliptical bandpass filter and an all-pass filter plotted as a function of the normalized frequency;

FIG. 10B is a graph showing the dispersion of a Gaussian pulse after it has been transmitted through the elliptical bandpass filter of Example 1;

FIG. 10C is a graph of the Gaussian pulse of FIG. 10B after it has been transmitted through an all-pass optical filter of the present invention;

FIG. 11 shows a graph of the time delay applied to an optical pulse by the 4th order all-pass optical filter described in Example 2; and

FIG. 12 is a graph which shows the dispersion correction applied to the wavelengths of the WDM system described in Example 3.

Detailed Description

[0025] The present invention is directed to an all-pass optical filter. The all-pass optical filter is optionally included in an optical communication system 100. As shown in FIG. 3, optical communication system 100 includes an optical fiber 115 and an all-pass optical filter 130. Optical communication system 100 optionally includes a variety of devices (not shown) such as light sources, photodetectors, switches, modulators, amplifiers, and filters. The optical fiber 115 is coupled with the all-pass optical filter 130. An optical pulse 120 is transmitted in optical communication system 100. The

optical pulse 120 contains a packet of frequencies. Each frequency of the packet of frequencies has an amplitude.

[0026] The optical pulse 120 transmitted in optical communication system 100 is input into the all-pass optical filter 130. The all-pass optical filter 130 reduces the dispersion of the optical pulses transmitted therethrough. The all-pass optical filter 130 reduces the dispersion of optical pulses by applying a desired phase response to optical pulses transmitted therethrough.

[0027] The desired phase response applies a frequency-dependent time delay to each frequency of each wave in the packet of waves contained in the optical pulse. Application of the frequency-dependent time delay to each frequency of each wave in the packet of waves contained in the optical pulse causes the total group delay of pulses transmitted through the all-pass optical filter to approximate a constant value. When the total group delay approximates a constant value, the dispersion of the optical pulse (first and higher order derivatives of the group delay) reduces to about zero.

[0028] The all-pass optical filter 130 of the present invention also has a frequency independent amplitude response. That is, the amplitude of each frequency of the optical pulse transmitted through the all-pass optical filter is substantially preserved.

[0029] As shown in FIG. 4A, the all-pass optical filter 130 includes at least one feedback path 145, a splitter/combiner 143, an input port 140, and an output port 150. The splitter/combiner 143 is coupled with at least one feedback path 145, the input port 140, and the output port 150. The splitter/combiner 143 couples portions of the input optical pulse into and away from the feedback path 145.

[0030] When an optical pulse 120 enters the all-pass optical filter, a portion of the optical pulse is provided to the feedback path 145. The portion of the optical pulse provided to the feedback path 145, circulates repeatedly therein. However, at each pass of the optical pulse in the feedback path 145, some portion thereof is provided through the splitter/combiner 143 to the output port 150. Providing some portion of the optical pulse circulating in the feedback path 145 through the splitter/combiner 143 to the output port 150, incrementally reduces the portion of the optical pulse introduced into the feedback path 145, in effect removing it therefrom.

[0031] Coupling ratios for the splitter/combiner 143 and the feedback path 145 determine the portions of the optical pulse 120 that are coupled into and away from the feedback path 145. The magnitude of the coupling ratios for the splitter/combiner 143 and the feedback path 145 are a matter of design choice.

[0032] The length of the feedback path 145 is typically much shorter (about one order of magnitude) than the optical pulse length. Thus, as the input optical pulse 120 circulates repeatedly along the feedback path 145, it interferes with itself. That is, the leading edge portions of the optical signal circulating in the feedback path interfere with the trailing edge portions of the optical signal being input thereto. Interference between the leading and trailing edges of the optical pulse applies the frequency dependent time delay to each frequency contained therein.

[0033] An alternate embodiment of the all-pass optical filter of FIG. 4A including a plurality of feedback paths is shown in FIG. 4B. In FIG. 4B one or more of the plurality of feedback paths may include at least one all-pass optical filter 100. When an all-pass optical filter is included in a feedback path, the all-pass optical filter 100 applies a frequency dependent time delay to the portions of the optical signal circulating in the feedback path 145 independent from any frequency dependent time delay applied by the feedback path 145.

[0034] FIG. 5 is a graph of the group delay of an all-pass optical filter having one feedback path. In FIG. 5, the normalized frequency, $(f_1 - f_0)/\text{free spectral range (FSR)}$, is plotted as a function of the time delay.

[0035] Frequencies in the packet of frequencies of the optical pulse that fit an integer number of wavelengths on the feedback path are termed resonant frequencies and have a normalized frequency equal to zero, denoted as 170 on the graph of FIG. 5. The maximum time delays are applied to the resonant frequencies 170. Frequencies that do not fit an integer number of wavelengths on the feedback path are termed off-resonant frequencies. Time delays less than the maximum time delays are applied to the off-resonant frequencies. For example, frequencies that are resonant frequencies 170 have a time delay of about 20 au (arbitrary units) applied thereto, while off-resonant frequencies located at a point A on the graph of FIG. 5, denoted as 175, with a normalized frequency of about -0.05 have a time delay of about 2.5 au applied thereto.

[0036] After the frequency dependent time delays are applied to each frequency of the optical pulse, the optical pulse is output from the all-pass optical filter through the output port 150.

[0037] In one embodiment of the present invention, the at least one feedback path of the all-pass optical filter has a ring resonator structure, as shown in FIGS. 6A-6B. The ring resonator structure includes one or more ring resonators 180 wherein each of the ring resonators is a closed loop. The one or more ring resonators are optionally arranged as a ring cascade or as a series of coupled rings.

[0038] FIG. 6A depicts a structure with a series of coupled rings 175, wherein a first ring resonator 181 is coupled with the splitter/combiner 178 and then the remaining ring resonators 180 are coupled one to another. For the series of coupled ring resonators 175, the feedback path has a length which includes the length of each of the ring resonators 180, 181. Filter parameters such as the coupling coefficients, κ , for each ring, denoted as κ_1 , κ_2 , and κ_3 , as well as the phase, ϕ , of each ring resonator, denoted ϕ_1 , ϕ_2 , and ϕ_3 , are also shown. The coupling coefficients and the phase of the ring resonators are determined based on the free spectral range (FSR) of the filter.

[0039] FIG. 6B shows the ring cascade structure, wherein each ring resonator 180 is independently coupled to a splitter/combiner 178. For the ring cascade structure, the feedback path has a length which includes the length of each of the ring resonators 180.

[0040] In an alternate embodiment of the present invention, the at least one feedback path of the all-pass optical filter includes at least one cavity 205 and a plurality of reflectors 210, as shown in FIG. 7A. At least one of the plurality of reflectors 210 has a reflectivity of about 100 %, while the remaining reflectors are partial reflectors with reflectivities less than 100 %. Twice the length of the cavity 205 determines the path length of the feedback path. The partial reflectors perform the functions of the splitter/combiner.

[0041] Multiple feedback paths are optionally formed by combining a plurality of reflectors 210 and a plurality of cavities 205, as shown in the coupled cavity structure 200 of FIG. 7B. The coupled cavity structure 200 includes at least two arms 203. Each arm 203 contains a plurality of cavities 205 and a plurality of reflectors 210. The two or more arms of the coupled cavity structure provide separate paths for the input optical pulse and the reflected optical pulse. For example, as shown in FIG. 7B, input path 206 is separate from output path 212.

[0042] Another embodiment of the present invention uses a photonic band gap (PBG) structure 220 as the feedback path of the all-pass optical filter, as shown in FIG. 8. FIG. 8 is a top view of the photonic band gap structure 220. The photonic band gap (PBG) structure includes periodic layers of a dielectric material which confine a range of frequencies within such periodic layers (not shown). Defects formed in a 2-dimensional array of such dielectric layers (2-D PBG) provides a guided feedback path 225 along which optical pulses are transmitted. Point defects (not shown) optionally formed at the edges of the 2-D PBG structure perform the functions of the splitter/combiner, coupling optical signals into and out of the feedback path.

[0043] The frequency-dependent time delay applied to the packet of frequencies contained in the optical pulse can be determined mathematically from the transfer function of the all-pass optical filter. For example, when the transfer function of the all-pass optical filter is:

$$H(z) = \frac{\prod_{i=1}^N (z_i - z^{-1})}{\prod_{i=1}^N (1 - z_i z^{-1})} \quad (1)$$

evaluated at $z = e^{j2\pi f/FSR}$ wherein f is the optical frequency, and the normalized frequency is $f_N = f/FSR$. The splitter/combiner design sets the values for z_k , wherein $z_k < 1$. From equation (1), the all-pass optical filter has an amplitude response of $|H(f)| = 1$. Such an amplitude response for the all-pass optical filter means that all frequencies in the packet of frequencies pass through the filter without a change in their amplitudes. The phase response $\phi(f)$ of the all-pass filter is

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}\{H(f)\}}{\text{Re}\{H(f)\}} \right] \quad (2)$$

wherein the frequency dependent time delay is determined from

$$\tau(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \quad (3)$$

[0044] Typically, the time delay for the input optical pulse $\tau_i(f)$ is combined with the time delay applied by the all-pass optical filter $\tau_{AP}(f)$ so the time delay for the output optical pulse $\tau_o(f)$ is expressed as

$$\tau_o(f) = \tau_i(f) + \tau_{AP}(f) = \text{constant} \quad (4)$$

The dispersion is proportional to $\frac{d\tau_o}{df}$, so when the time delay of the output optical pulse, $\tau_o(f)$, approximates a constant

value, the dispersion of the optical pulse is expressed as

$$\frac{d\tau_o}{df} \approx 0 \quad (5)$$

[0045] Based on the dispersion of the input optical pulses determined from equation (4), the all-pass filter is designed. Filter parameters such as the number of stages (feedback paths), feedback path lengths, and splitter/combiner coupling ratios which best approximate

$$-\tau_i(f) + \text{constant} \quad (6)$$

are used to design the all-pass optical filter. An optimization routine may be used to obtain design values which minimize a given error condition.

[0046] For example, in the Nth order all-pass optical filter having a ring resonator structure, the coupling ratios and the pole locations for each ring are calculated from the transfer function

$$H(z) = e^{j\phi} (p e^{-j\phi} - z^{-1} / 1 - p e^{j\phi} z^{-1}) \quad (7)$$

wherein the coupler path amplitude transmission is designated by $p = \sqrt{1 - \kappa}$, where κ is the coupling ratio of the ring resonator, and ϕ is a phase associated with one feedback path. The free spectral range (FSR) is given by $\text{FSR} = c / (n_o 2\pi R)$, where R is the ring radius, and n_o is the effective index of the fundamental mode.

[0047] From equation (7), to produce a pole at z_n , for the structure shown in FIG. 6B, requires a coupling ratio of $\kappa_n = 1 - |z_n|^2$ a phase response of $\phi_n = \arg(z_n)$. The rings are nominally the same circumference with an incremental length or index change added to each ring to realize the phase response, e.g.

$$\phi_n = \frac{2\pi \Delta n l}{\lambda}$$

or

$$\phi_n = \frac{2\pi n \Delta l}{\lambda}$$

Heaters 185, having a length, l , are optionally deposited on a section of the ring to locally change the incremental length and create the desired phase, as shown in FIG 6B.

[0048] Another embodiment of the all-pass optical filter of the present invention forms the feedback path from a Mach-Zehnder Interferometer (MZI) as shown in FIGS. 9A and 9B. The MZI structure shown in FIG. 9A has more than one coupler, denoted as 308. In the MZI structure 300, a phase shifter 305 is optionally used to tune the coupling of optical pulses into and out of the feedback path, providing a tunable all-pass optical filter. The couplers 308 are optionally identical. The MZI structures shown in FIGS. 9A - 9B, are folded to minimize any increase in the feedback path length. In Fig. 9A, the MZI path lengths of waveguide arms 303, 304 are slightly different, but the difference is much smaller than the feedback path length. The slightly different feedback path length provides flexibility for designing wavelength dependent feedback coupling. Multiport MZIs, i.e. with greater than 2 arms, could also be used to further control the wavelength dependent feedback coupling.

[0049] In Fig. 9B, the path lengths of each arm 303, 304 are made substantially identical by crossing the waveguide arms. For such a structure, optical signal loss is reduced by increasing the crossing angle for the waveguide arms. Crossing the waveguide arms is desirable for large feedback coupling because the effective κ can be made large without affecting fabrication tolerances.

[0050] The all-pass optical filters of the present invention are suited for use in optical communication systems. For example, all-pass optical filters are suitable for use in optical communication systems which include multiplexers and/or demultiplexers. Coupling one or more all-pass optical filters to the front end of the multiplexer, reduces the dispersion of optical signals that are to be multiplexed. Conversely, coupling one or more all-pass optical filters to the back end of the demultiplexer, reduces the dispersion of optical signals after they are demultiplexed. In such systems, the one or more all-pass optical filters are optionally arranged as a concatenated series.

[0051] All-pass optical filters are also suitable for use in optical communication systems which include a gain equalizer filter (GEF). For example, coupling an all-pass optical filter to the front end of a gain equalizer filter optionally increases or decreases the amplitude of optical signals transmitted therethrough. Such an amplitude correction is important when transmitting optical signals between optical communication systems having different amplitude responses.

[0052] Optical systems such as WDM systems typically include multiple channels having multiple wavelengths (frequencies). In some WDM systems it is desirable to reduce the dispersion of each channel, separately. For example, many optical fibers have a dispersion slope around +0.08 ps/nm²-km. This means that the dispersion applied by the optical fiber to each channel is different. The problem is that even though the dispersion may be compensated perfectly at one wavelength, other wavelengths will have nonzero dispersion due to this dispersion slope. An all-pass filter can be designed to compensate the optical fiber's dispersion slope. For such an all-pass optical filter, the coupling ratios or partial reflectance values are varied gradually as a function of wavelength.

[0053] The all-pass optical filter of the present invention is optionally suitable for delaying the transmission of optical pulses in time. The all-pass optical filter delays the transmission of optical signals by lengthening the time delay of optical pulses transmitted therethrough.

[0054] The following examples are provided to illustrate a specific embodiment of the present invention.

Example 1

[0055] An optical communication system includes an elliptical bandpass filter. The optical system is a WDM system with a channel spacing of about 100 GHz, a per channel bit rate of about 8 Gb/s, and a passband width of about 11 GHz. The elliptical bandpass filter has an amplitude response, denoted as 400 in FIG. 10A, as well as approximately parabolic group delay across the pass band, denoted as 405. FIG. 10B shows the effects of dispersion on a Gaussian pulse 415 after it has been transmitted through the elliptical bandpass filter.

[0056] A ring resonator structure is desired for the feedback path of the all-pass optical filter. The phase function for the elliptical bandpass filter and the all-pass optical filter are then determined as

$$\tau_{BP}(f) + \tau_{AP}(f) \approx \text{constant.} \quad (8)$$

[0057] Based on the group delay for the input optical signals, the number of stages for the all-pass optical filter are determined. For this example, assume 4 stages. The all-pass optical filter's group delay response depends on its pole locations. Both a magnitude and a phase must be specified for each pole. The pole locations are determined from $H(z)$ (see equation 1). An initial choice for the pole locations is made to start the optimization process. The pole locations are then varied to minimize an error criterion. The following error criterion was used

$$E = \sum_{k=1}^N |\tau_{AP}(f_k) + \tau_{BP}(f_k) - \tau_{AP}(f_c) - \tau_{BP}(f_c)|^2 \quad (9)$$

where the passband is sampled at N points, f_k , and f_c is the frequency at the center of the passband. (See also, Madsen, C. et al. "Optical All-Pass Filters for Phase Response Design with Applications for Dispersion Compensation", IEEE Phot. Technol. Lett., vol. 10, no. 7, pp. 994-996, July (1998) and also Madsen, C. et al., "A General Planar Waveguide Autoregressive Optical Filter", J. Light. Technol., vol. 14, no. 3, pp. 437-447, March (1996), which are hereby incorporated by reference).

[0058] The resulting filter parameters for the all-pass optical filter are given in TABLE 1. The filter parameters for both the coupled ring structure (κ_L , ϕ_L) and the coupled cavity structure ($|p_L|$, $\phi_L + \pi + \angle p_L$) are listed. In TABLE 1, κ is the coupling ratio of the rings, ϕ is the phase of the rings or cavities, and p is the partial reflectance of the reflectors. TABLE 1 also includes the filter parameters for the cascade ring structure (κ_c, ϕ_c) and the cavity structure ($|p_c|$, $\phi_c + \pi + \angle p_c$). The phases, ϕ , are given in radians.

TABLE 1

Coupled			Cascade		
κ_L	$ p_L $	ϕ_L	κ_c	$ p_c $	ϕ_c
0.0000	1.0000	0.0000	0.2079	0.9027	-0.0732
0.0133	0.9933	0.0000	0.2079	0.9027	0.0732
0.0284	0.9857	0.0000	0.1910	0.8923	0.2258
0.0848	0.9567	0.0000	0.1910	0.8923	-0.2258
0.5894	0.6408				

[0059] The all-pass optical filter has a group delay characteristic, denoted as 408 in FIG. 10A. When the Gaussian pulse having a pulse characteristic described by 415 is transmitted through the all-pass optical filter with the parameters described above, the dispersion of the resulting optical pulse 425, is reduced as shown in FIG. 10C.

5 Example 2

[0060] All-pass optical filters are also useful for delaying an optical pulse in time. A 4th order all-pass filter is chosen to approximate a delay time of 16 au (arbitrary units) over the normalized frequency range of 0.4 to 0.6. The filter parameters for a cascade structure using either rings (κ, ϕ) or cavities ($\rho, \phi + \pi + \angle \rho$) are shown in TABLE 2.

TABLE 2

$ \rho $	κ	ϕ
0.8169	0.3326	2.7278
0.7721	0.4039	3.0009
0.8169	0.3326	-2.7278
0.7721	0.4039	-3.0009

The time delay for an all-pass optical filter with the parameters described above is shown in FIG. 11. The group delay applied to frequencies within the passband is essentially constant and much larger than the group delay applied to frequencies outside the passband.

25 Example 3

[0061] An all-pass filter described below compensates for the dispersion slope of an optical fiber. The all-pass optical filter is designed to compensate the dispersion slope of 250 km of fiber over a 40 nm range. The difference in dispersion at 1525 nm and 1565 nm is designed to be 800 ps/nm, with the longest wavelength having the most negative dispersion. The FSR is chosen to be an integer multiple of the system channel spacing. For this example a value of 25 GHz is selected. The bandwidth over which the dispersion approximates a constant value is about 5 GHz. The all-pass optical filter parameters (phase, partial reflectors or couplers) are optimized at several wavelengths over the 40 nm range for the specific dispersion required at each wavelength. A set of filter parameters (one for each wavelength) are determined. The parameters are shown in TABLE 3 for a cavity structure. The phase values, ϕ , of the all-pass optical filter were constrained to be constant to simplify fabrication requirements. For the reflector design the cavity phase is given by $\phi + \pi + \angle \rho$.

TABLE 3

	WAVELENGTH				
	1525	1535	1545	1555	1565
$ \rho 1 $	0.000	0.005	0.067	0.132	0.175
$ \rho 2 $	0.031	0.098	0.117	0.143	0.202
$ \rho 3 $	0.096	0.207	0.247	0.280	0.299
$\phi 1$	-1.992	-1.992	-1.992	-1.992	-1.992
$\phi 2$	-1.534	-1.534	-1.534	-1.534	-1.534
$\phi 3$	2.981	2.981	2.981	2.981	2.981

[0062] The resulting dispersion correction for each wavelength is shown on the graph of FIG. 12. For wavelengths near 1565 nm, the dispersion is about -1000ps/nm. For wavelengths near 1525 nm, the dispersion is about -200 ps/nm. Thus, the all-pass optical filter compensates for the dispersion slope of the fiber.

Claims

1. An all-pass optical filter comprising:

5 an input port;
 an output port;
 a splitter/combiner; and
 at least one feedback path, wherein the all-pass optical filter is configured to apply a desired phase response
 to an optical pulse input to the all-pass optical filter, wherein the input optical pulse has a packet of frequencies,
 10 each frequency having an amplitude, and wherein the all-pass optical filter is further configured to substantially
 preserve the amplitude of each frequency of the optical pulse transmitted through the all-pass optical filter.

2. A method of reducing the dispersion of optical pulses comprising the steps of:

15 inputting an optical pulse into an all-pass optical filter, wherein the all-pass optical filter includes an input port,
 an output port, a splitter/combiner, and at least one feedback path, and wherein the input optical pulse contains
 a packet of frequencies, each frequency having an amplitude;
 applying a desired phase response to the optical pulse input to the all-pass optical; and
 transmitting the optical pulse out of the all-pass optical filter, wherein the amplitude of each frequency of the
 20 optical pulse transmitted through the all-pass optical filter is substantially preserved.

3. The filter of claim 1, or the method of claim 2, wherein the at least one feedback path of the all-pass optical filter
 comprises at least one ring resonator, and/or the at least one feedback path comprises a plurality of ring resonators
 arranged as a ring cascade, or the at least one feedback path comprises a plurality of ring resonators arranged as
 25 a series of coupled rings, or the at least one feedback path of the all-pass optical filter comprises one or more cav-
 ities and a plurality of reflectors, and wherein one reflector of the plurality of reflectors has a reflectivity of about
 100%.

4. The filter of claim 3, or the method of claim 2, wherein one or more reflectors in the plurality of reflectors is a partial
 30 reflector.

5. The filter of claim 1 or the method of claim 2, wherein the at least one feedback path of the all-pass optical filter
 comprises a photonic band gap (PBG) structure.

6. The filter of claim 1, or the method of claim 2, wherein the photonic band gap structure includes a plurality of peri-
 35 odic layers of a dielectric material for confining the packet of frequencies of the optical pulse.

7. An optical communication system comprising one or more all-pass optical filters, wherein the one or more all-pass
 optical filters include:

40 an input port;
 an output port;
 a splitter/combiner; and
 at least one feedback path, wherein the all-pass optical filter is configured to apply a desired phase response
 to an optical pulse input to the all-pass optical filter, wherein the input optical pulse has a packet of frequencies,
 45 each frequency having an amplitude, and wherein the all-pass optical filter is further configured to substantially
 preserve the amplitude of each frequency of the optical pulse transmitted through the all-pass optical filter.

8. The optical communication system of claim 7, wherein the all-pass optical filters are arranged as a concatenated
 50 series.

FIG. 1

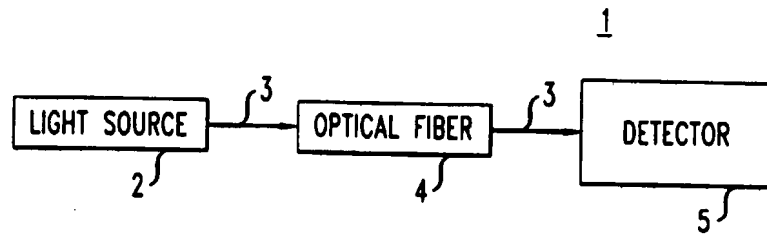


FIG. 2A

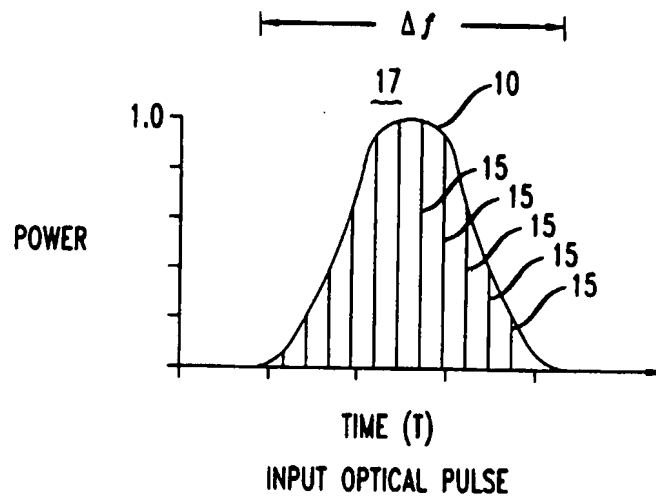


FIG. 2B

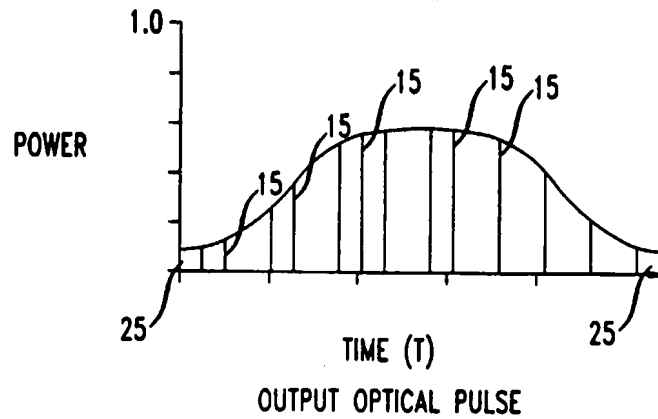


FIG. 3

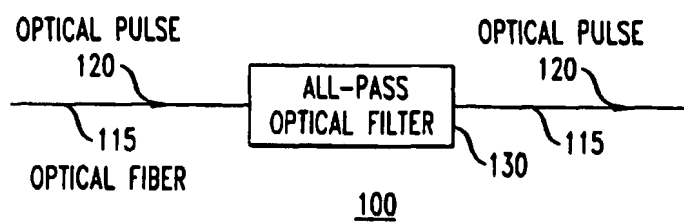


FIG. 4 A

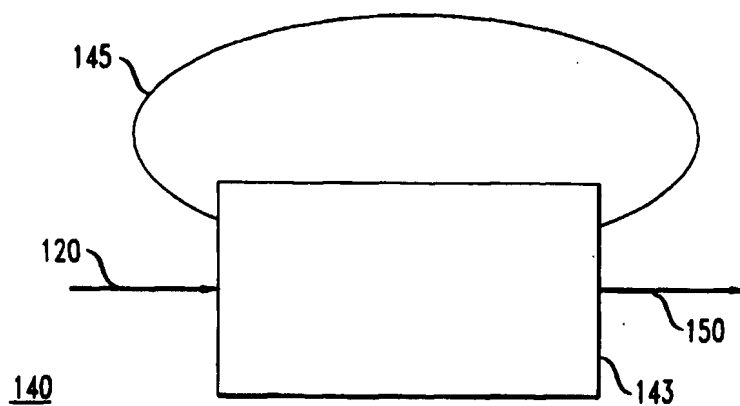


FIG. 4 B

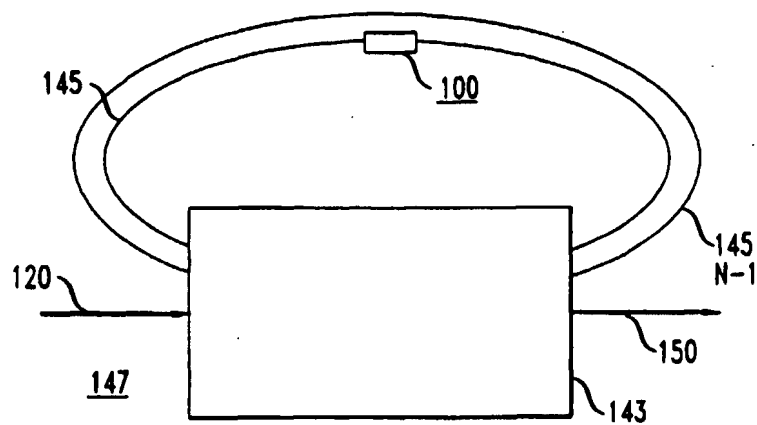


FIG. 5

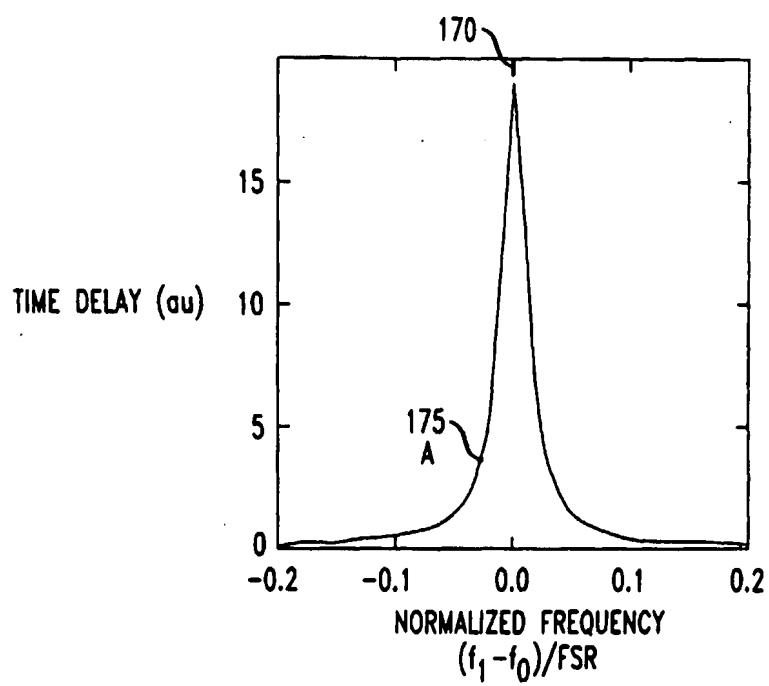


FIG. 8

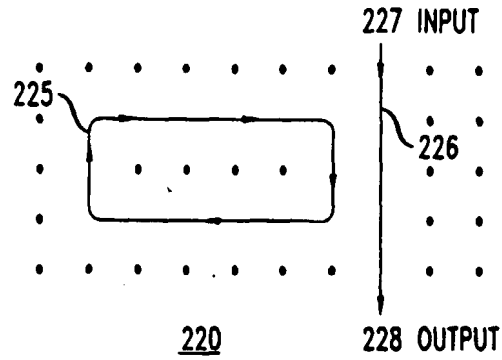


FIG. 9A

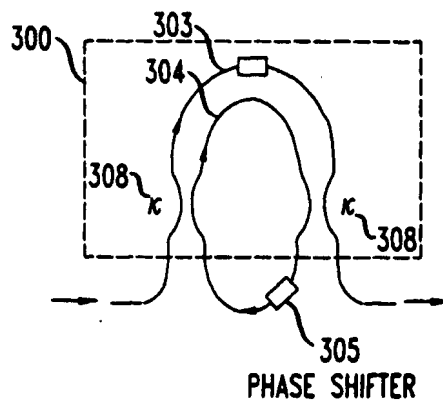


FIG. 9B

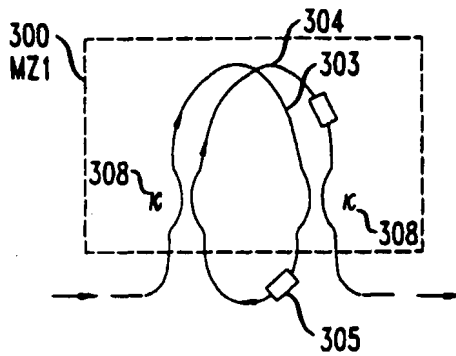


FIG. 10A

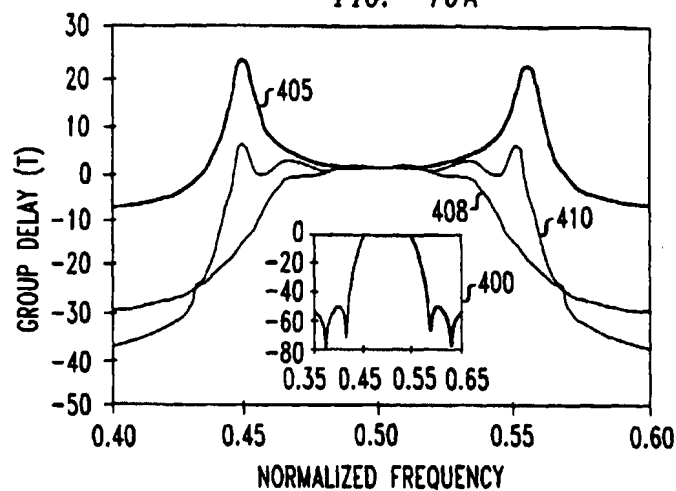


FIG. 10B

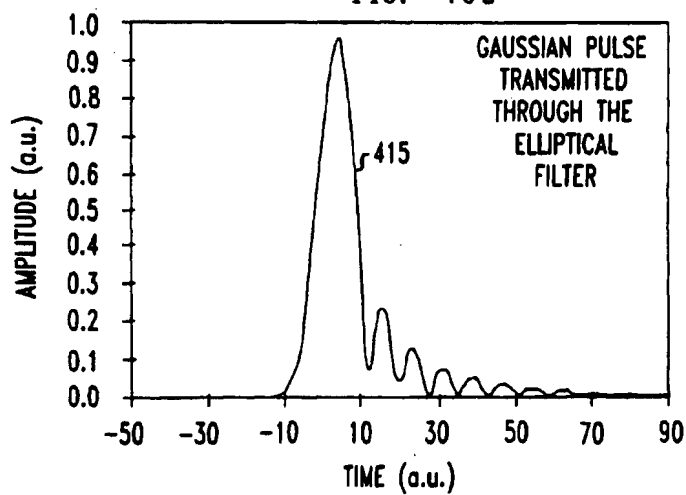


FIG. 10C

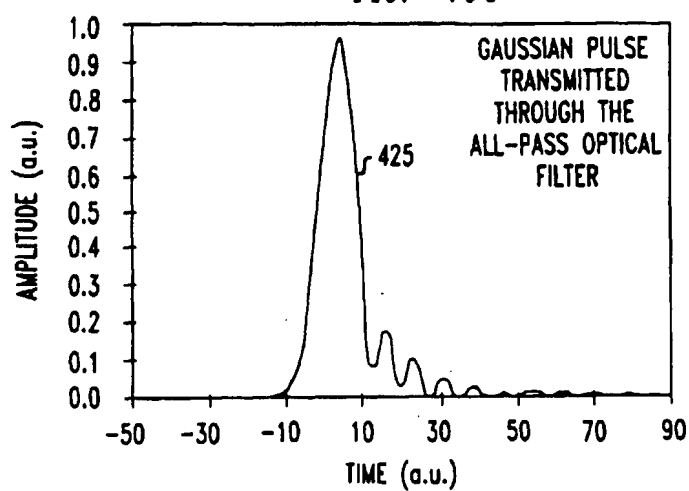


FIG. 11

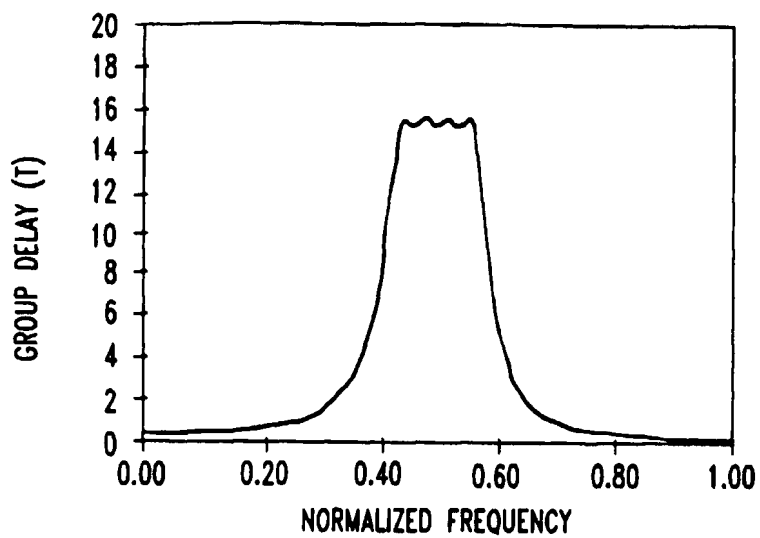
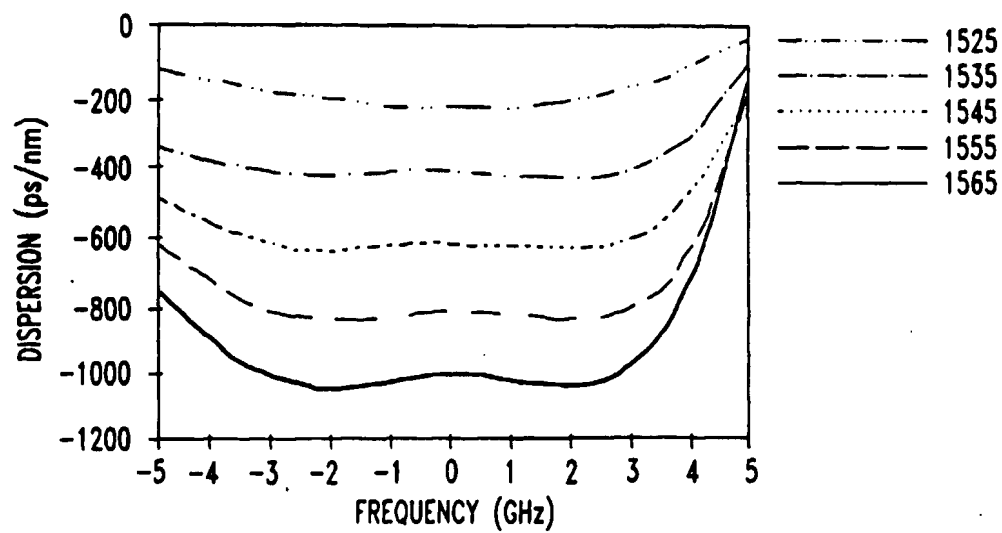


FIG. 12



29p-L-9

2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス 一面内ヘテロ構造の提案 -
 Optical Add/Drop Filter Using 2D Photonic Crystal - Proposal of in-plane heterostructure -
 京大理工, CREST-JST
 Kyoto Univ., CREST-JST
 T. Amano, M. Machizuki, B. S. Song, and S. Noda
 E-mail: tuzuma@kumamoto-u.ac.jp

【明】本発明は2次元フォトニック結晶スラブの単一欠陥を用いた波長分合波・合波器を提案し、その動作を検討してきた。これまではアクセプタ型の欠陥では、主に欠陥の大きさを変化させることで、分合波波長を制御することを考えてきた。この方法では波長を変化させると、分合波の効率等の特性が低下するので、これを一定に保つための制御が必要となる。またドナー型欠陥^{1,2}では、そもそも欠陥の大きさによる波長の制御が難しいと考へられる。そこで今回、面内ヘテロ構造を用いることにより、どのような欠陥に対しても波長を制御でき、かつ分合波効率も保つことのできる方法を提案した。【提案】フォトニック結晶の特性の基本となるマクスウェル方程式は波長を λ で規格化し、周波数を c/λ で規格化すると、方程式そのものは λ の大きさに依存しない形となる。よって、右図のように波長の基準だけを a から b と変化させ、全体が a/b 倍になった比例縮小を伴った場合、欠陥の共振周波数は a/b 倍に変化するが、分合波効率といふ点に関しては変化しない。この方法を用いれば、分合波効率を一定に保ちつつ、欠陥の共振周波数のみを変化させることが可能となる。さらに右図のように導波路の伝播方向に沿って、波長の基準が異なるフォトニック結晶領域をつないで面内ヘテロ構造を用いることで、分合波特性のそろった多波長分合波デバイスを作成することが可能である。また、この方法ではヘテロ接合面における反射の影響を低減しておき、必要があるが、3次元FDTD法による後述の結果、ヘテロ接合面における周波数の変化が2%程度であり、導波路の反射は殆ど無視できることが分かった。この2%の周波数の変化は、 $1.5\mu\text{m}$ 帯において波長の共振波長の変化に相当するため、実用的な波長制御範囲ではヘテロ接合面の反射は無視できるといえる。詳細は当日発表する。【謝辞】本研究の一部は文部科学省科学研究費特定領域(0)および京大VREの助成を受けた。【文献】1) S. Noda, A. Crutkin, and M. Imada, Nature, 407 (2000) 608, 2) A. Crutkin, M. Machizuki, M. Imada, and S. Noda, AP, 79 (2001) 2650, 3) 須田T明、野田達、他、本特許提案、4) 望月理光、野田達、他、本特許提案

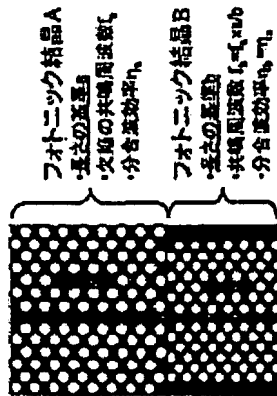


図:面内ヘテロ構造の概念図

Optical add/drop filter using 2D photonic crystal - proposal of in-plane heterostructure

T. Asano, M. Mochizuki, B. S. Seong, and S. Noda

Kyoto University Graduate School of Engineering, CREST-JST

[Introduction] We propose an optical add/drop device using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs, and investigate the operation thereof¹⁾. Until now, in acceptor-type defects, controlling the add/drop wavelength has mainly been carried out by changing the size of the defects. In this method, when the wavelength is changed, properties such as the effectiveness of the add/drop and the like change, and thus, separate control for maintaining constant properties becomes necessary²⁾. In addition, in a donor-type device^{3, 4)}, it is thought that the control of the wavelength by using the size of the defect is inherently difficult. Thus, here we propose a method in which it is possible to control the wavelength with respect to any type of defect and it is also possible to maintain the add/drop efficiency by using an in-plane heterostructure.

[Proposal] The Maxwell equation, which provides the basis for the properties of the photonic crystal, takes a form in which the equation itself is not dependent on the size of a when the length is normalized using a and the frequency is normalized using c/a . Thus, as shown by the figure on the right, in the case in which only the reference of the length is changed from a to b and a proportional structure is produced in which the whole changes by b/a times, the resonance frequency of the defects is changed by b/a times, but the non-dimensional quantity of the add/drop efficiency is not changed. By using this method, it becomes possible to change only the resonance frequency of the defects while maintaining a constant add/drop efficiency. Furthermore, as shown in the figure on the right, by using an in-plane heterostructure that is linked to the photonic crystal region in which the reference of the length is different along the propagation direction of the waveguide, it becomes possible to produce an optical add/drop device having uniform add properties. In addition, although it is necessary to investigate the influence of reflection at the hetero-junction surfaces in this method, according to the results of an investigation using three-dimensional FDTD, it was understood that if the change in the period at the hetero-junction is about 2%, the reflection of the guided light can be ignored. This 2% change in the cycle corresponds to a change in the resonance wavelength of 30 nm in the 1.5 μm band, and thus it can be said that the reflection of the hetero-junction surfaces can be ignored in the practical wavelength control range. The details will be announced on the day of the lecture.

[Acknowledgments] A portion of this research was assisted by a Ministry of

Education and Science Research Grant Area (B) and Kyoto University VBL.

[References]

- 1) S. Noda, A. Chutinan, and M Imada, Nature, 407 (2000) 608
- 2) A. Chutinan, M. Mochizuki, M. Imada, and S. Noda, APL, 79 (2001) 2690
- 3) M. Imada, S. Noda, et al., in the these Proceedings of the Japanese Society of Applied Physics
- 4) M. Mochiziki, S. Noda et al., in the these Proceedings of the Japanese Society of Applied Physics

Figure

Conceptual Drawing of an In-plane Heterostructure

Photonic Crystal A

- Reference a of length
- Resonance frequency ξ_a of defect
- Add/drop efficiency η_a

Photonic crystal B

- Reference b of length
- Resonance Frequency $f_b = f_a \times a/b$
- Add/drop frequency $\eta_b = \eta_a$

28p-YN-1

チャープ構造をもつフォトニック結晶導波路の検討

A study on chirped photonic crystal waveguides

横浜国立大工, O森大祐, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., D. Mori and T. Baba

baba@ynu.ac.jp

ヘテロ構造を利用したフォトニック結晶デバイス^{1,2}が提案されているが、本研究ではフォトニック結晶スラブ単一線欠陥導波路に対して図 1(a)のように円孔直径を徐々に拡大・縮小させるチャープ構造の導入を検討した。

フォトニックバンド構造にある TE-like 基本導波バンドは、群速度が 0 になるカットオフ周波数と、ライトラインによって放射モードとなる周波数に挟まれている³。同じバンドのフォトニック結晶の円孔直径を変化させると、この導波バンドが上下する。したがって、図 1(b)のように光の群速度が徐々に低下する現象、または図 1(c)に示すような導波路の途中で光がライトラインを越えて放射する現象を得ることができる。チャープ関数を最適化することで、前者は光の遅延や分岐制御、共振器など、後者は光フィルタなどへの応用が考えられる。スラブの等価屈折率 2.963 を用いた 2 次元フォトニックバンド計算により、規格化円孔直径 $2/a$ に対する導波バンド領域を図 2 に示す。 $2/a$ を 0.5 ~ 0.7 の範囲でチャープさせることで、効果が期待できる。挿入図は $a\lambda = 0.26$ の伝搬光が $2/a = 0.7$ の位置において停止している様子である。参考文献-1) T. Sato et al., JQE 38 (2002) 904, 2) 浅野 他, 光通信 (2002) 29p-L-9, 3) M. Notomi et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2002) 253902.

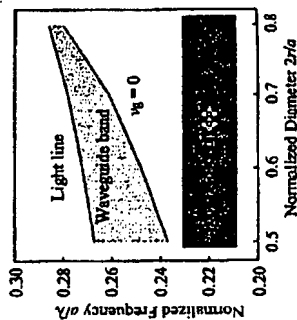


図 2 基本導波バンドの挿入図。下の挿入図は $a\lambda = 0.26$ で光が停止していることを示す断面位置の分布の EMD 計算結果。

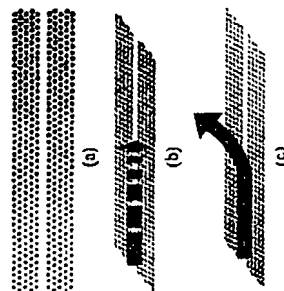


図 1 円孔径をチャープさせた導波路構造(a)、群速度の低下(b)、ライトラインによる放射の様子(c)。

A study on chirped photonic crystal waveguides

Yokohama National University

D. Mori and T. Baba

We have proposed photonic crystal devices^{1), 2)} that use a heterostructure, and in our present research, we are investigating the introduction of a chirped structure that gradually expands or reduces the hole diameters of single line defect waveguides in photonic crystal slabs, as shown in FIG. 1(a). The TE-like fundamental waveguide band, which is the photonic bandgap zone, is between the cut-off frequency, where the group velocity is 0, and frequencies that are in the radiation mode defined by the light line³⁾. When the hole diameters of a photonic crystal that have the same pitch are changed, the waveguide band thereof rises or falls. Therefore, it is possible to obtain the phenomenon in which, as shown in FIG. 1(b), the group velocity of the light gradually decreases, and the phenomenon in which, as shown in FIG. 1(c), the light along the waveguide passes beyond the light line and is radiated. By optimizing the chirp function, it is thought that the former phenomenon can be applied to the delay and dispersion control of light, oscillators and the like, and the later phenomenon can be applied to light filters and the like. The waveguide band region for a normalized hole diameter $2r/a$, which is obtained by a two-dimensional photonic band calculation using 2.963 as the equivalent refractive index of a slab, is shown in FIG. 2. By chirping the holes with $2r/a$ in a range of 0.5 to 0.7, these effects can be expected. The inserted figure shows the state of propagated light, for which $\alpha/\lambda = 0.26$, stopping at the position where $2r/a = 0.7$.

References:

- 1) T. Sato et al., JQE 38 (2002) 904
- 2) Asano et al, Japan Society for Applied Physics (2002) p. 29p-L9
- 3) Notomi et al., Phys Rev. Lett. 87 (2002) 253902

FIG. 1 (a) a waveguide structure that chirps the hole diameters; (b) the reduction of the group velocity; (c) the appearance of the radiation due to the light cone.

FIG. 2 Region of the fundamental waveguide band; the inserted figure is the FDTD calculation result for the magnetic field distribution that is normal to the surface showing that the light has stopped at $\alpha/\lambda = 0.26$.

A Dispersion Compensator Using Coupled Defects in a Photonic Crystal

Kazuhiko Hosomi and Toshio Katsuyama

Abstract—We propose a new type of dispersion compensator that uses the characteristics of light traveling in a coupled defect waveguide (CDW) in a photonic crystal. By using a theoretical computation based on the plane-wave method, we show that the CDW band appears within the bandgap and its characteristics are well reproduced by the tight-binding (TB) model. We calculate the wavelength dispersion of light propagating in the CDW using TB formalism. The calculated result shows an inherently large dispersion of the CDW, which enables the realization of an extremely small dispersion compensator of a few tens of millimeters in size.

Index Terms—Coupled defect waveguide, dispersion compensator, group velocities, photonic crystal, tight-binding model.

I. INTRODUCTION

THE PAST few years have witnessed growing interest in the use of photonic crystals as a new type of material that can be used to control electromagnetic waves. The photonic crystal is a multidimensional periodic structure comprising combinations of two or more media different in refractive index. In these structures, the electromagnetic wave propagation is inhibited in certain frequency ranges, which is called a photonic bandgap, analogous to electronic bandgaps in semiconductors [1], [2]. Various types of optoelectronic devices that use photonic crystals have been presented [3]–[6]. In particular, waveguides that are formed by removing a series of elements have attracted much attention [7]–[13]. This is because a planar lightwave circuit (PLC) having dimensions of only a few hundred square micrometers, and thus called a μ -PLC [14], can be realized by using just such a type of waveguide.

Recently, a new type of waveguide was theoretically proposed and experimentally demonstrated [15]–[20]. It is a waveguide based on light transmission in the coupled microcavity. The concept is as follows. By introducing a point defect, i.e., a nonuniform element, in the periodic structure of a photonic crystal, it is possible to create highly localized defect modes within the photonic bandgap. That is, such a defect forms an ideal microcavity in which a localized light field is strongly confined with a high quality factor. However, when cavities are placed at a suitable distance, an overlap between the nearest-neighbor fields causes the photons trapped in a single defect to transfer to the neighbor. This picture of the photon transmission is an optical analog one of the tight-binding (TB) formalism, which has been proven to be very useful in studying the electronic properties of solids. In a series of defects, the propagation is sequentially repeated

and incident light propagates through the defects one after another. This demonstrates the principle of a waveguide that consists of serial defects in a photonic crystal. We call this type of waveguide a coupled-defect waveguide (CDW). According to the TB picture, the group velocity shows continuous change in the CDW band and the maximum value is quite small. Moreover, since the light propagation in a CDW is caused by the overlap between nearest-neighbor fields, sharp-bend and zigzag structures are possible. Thus, a CDW has potential suitability for use as the waveguide in a μ -PLC.

In addition to the above-mentioned application, the dispersion compensator is one of the most promising applications of a CDW. A dispersion compensator is one of the key devices in a high-bit-rate optical communication system. The signal-pulse waveform is degraded through its traveling in the optical fiber, because the fiber has wavelength dispersion. This waveform degradation is a serious factor that restricts the transmission distance and transmission capacity of an optical communications system. Therefore, the use of pulse-resaping technology is required, particularly in a high-bit-rate optical communications system. The waveform reshaping is done with a simple method: by inserting a waveguide having dispersion of the opposite sign. Hence, degradation of the waveform is cancelled out. In the current system, the dispersion-compensating fiber (DCF) is the most commonly used. However, since the absolute value of dispersion of a DCF is as small as a few tens of picoseconds/nanometers/kilometers, a few-kilometers-long fiber is necessary to compensate completely, which makes the compensator large and expensive. Therefore, a compact and low-cost dispersion compensator is required by the market place.

In this paper, we present a dispersion compensator whose specifications satisfy the requirements for its use in a high-bit-rate optical communications system. We first discuss the characteristics of a photon traveling through the coupled defect waveguide in photonic crystals, which is based on the results of the calculation performed by solving Maxwell's equations using the plane-wave method. We next describe a dispersion compensator that meets these requirements by using the characteristics of light traveling in coupled defects in a photonic crystal. Next, we analyze these results using the tight-binding formalism and calculate the dispersion value of the light traveling in the CDW.

II. MODEL STRUCTURE AND CALCULATED RESULTS

Fig. 1 shows a model structure that is made of a sequence of defects in a 2-D photonic crystal. The lattice consists of a square

Manuscript received September 27, 2001.

The authors are with the Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tokyo 185-8601, Japan.

Publisher Item Identifier S 0018-9197(02)05693-2.

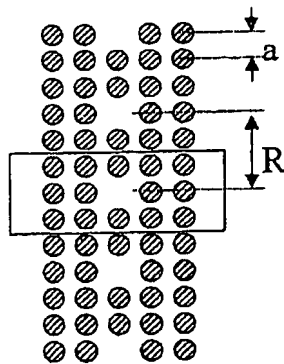


Fig. 1. The modeled structure: the coupled defect waveguide in a 2-D photonic crystal.

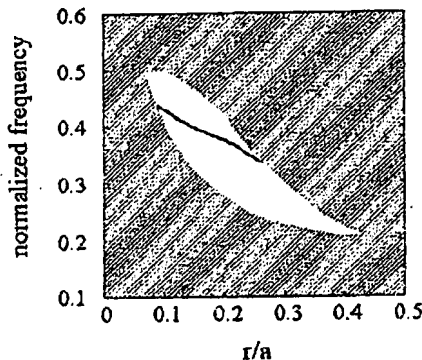


Fig. 2. Plot of the single-defect state with a function of r/a . The TM bandgap map for a complete square lattice of dielectric rods is also shown. The assumed refractive index n is 0.35.

array of dielectric rods in air with lattice constant a . The refractive index of the rods is 3.5 and their radius is r . The CDW structure is formed by removing every n th rod in the Γ - X direction. Thus, the defect separation constant R is n times as large as the lattice constant a : $R = na$. In Fig. 1, the square disclosing rods and defect indicate the supercell for the theoretical calculation.

The computations were done using the *MIT Photonic-Band* [21], [22], a software package used to compute the definite-frequency eigenstates of Maxwell's equations by using the plane-wave method.

We show first the calculated results for the single-defect state: the eigenstate of the isolated single defect in a photonic crystal. Fig. 2 shows a single-defect state for the TM mode as a function of r/a . Here, we focus the discussion on the TM mode, because the square-rod structure has a bandgap only in the TM mode. In Fig. 2, the white area surrounded by the gray area indicates a bandgap that opened in the region of $0.06 < r/a < 0.42$. The thick line crossing the bandgap region represents the single-defect state. We see a unique defect state in the region of $0.1 < r/a < 0.3$. Since the defect state is in the center of the bandgap at $r/a = 0.16$, we set the r/a of 0.16 in the following calculation. When $r/a = 0.16$, the bandgap opens at $0.3165 < \omega a/2\pi c < 0.4618$ and the defect state is at $\omega a/2\pi c = 0.3896$. Fig. 3 shows the electric-field distribution of the defect state at $r/a = 0.16$. As seen in this figure, the defect supports a fundamental mode.

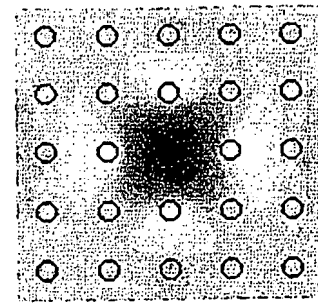


Fig. 3. Electric-field distribution of the single-defect mode when $r/a = 0.16$. The corresponding normalized frequency $\Omega a/2\pi c$ is 0.3896.

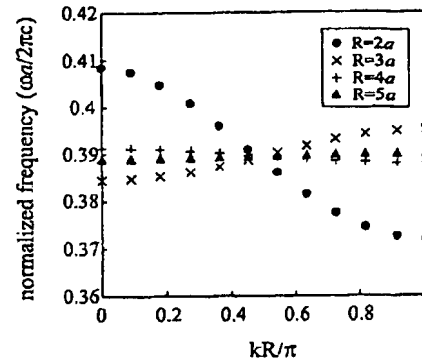


Fig. 4. Calculated dispersion diagrams of the CDW bands for $R = 2a, 3a, 4a$, and $5a$.

Fig. 4 compares the calculated dispersion relation, which is the relation between the normalized frequency and kR/π , for $R = 2a, 3a, 4a$, and $5a$. As shown in Fig. 4, each band has a wavevector dependence. If each single microcavity is not coupled to its neighbor, the eigenfrequency is independent from the wavevector. Thus, the wavevector dependence on a normalized frequency means that the defects are coupled to each other and light can travel through the sequence of defects.

As shown in Fig. 4, the normalized frequency of the CDW band changes widely when $R = 2a$. Also, the range of changes in the normalized frequency of the CDW band decreases with increases in R ; the bandwidths $\Delta\omega$ are $0.0365, 0.0107, 3.23 \cdot 10^{-3}$, and $1.05 \cdot 10^{-3}$ for $R = 2a, 3a, 4a$, and $5a$, respectively.

Fig. 4 also shows another remarkable feature: the R dependence of the slope direction of the frequency change. When $R = 2a$ or $4a$, the normalized frequency decreases with increases in wavevector. On the other hand, when $R = 3a$ or $5a$, the slope of the bands is the opposite. At present, we cannot offer a lucid explanation; however, further study is needed to understand this phenomenon completely.

III. TIGHT BINDING ANALYSIS

The calculated band structures are analyzed using the TB formalism [17], [18], [23], [24]. Whereas, various forms based on the TB model have been successfully applied to photonic systems, we adopted the notation used by Yariv *et al.* [18]. Assuming that the resonant frequency of each defect cavity is defined as Ω , and the angular frequency of the light traveling

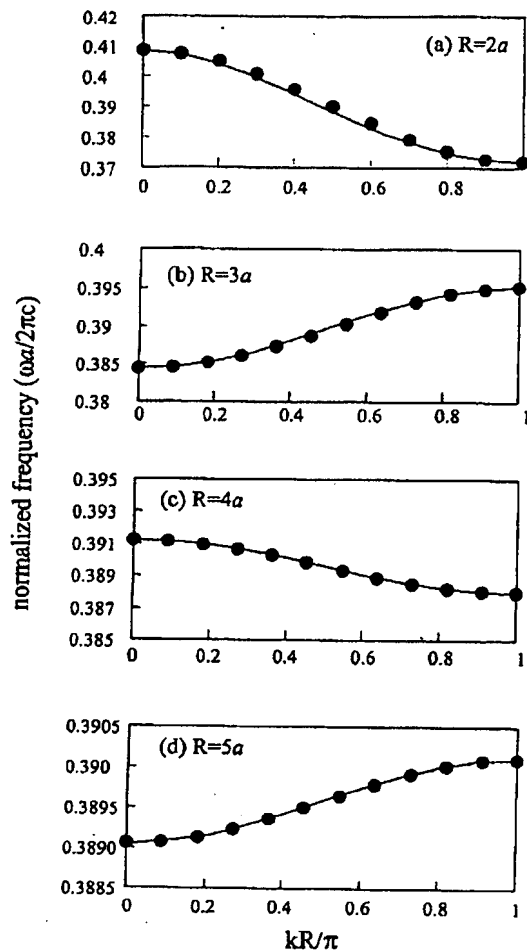


Fig. 5. Comparison between the TB model (solid lines) and the resulting calculations using plane-wave method (closed circles): (a) R is $2a$, (b) $3a$, (c) $4a$, and (d) $5a$. In each chart, the lines represent the plots of (1), where κ and $\Delta\alpha$ are fitting parameters.

through a CDW is defined as ω , the following relation is established under the TB approximation:

$$\omega = \Omega \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{2} + \kappa \cos(kR) \right) \quad (1)$$

where κ indicates a coupling factor that is the value related to the overlapping of the electric field between the localized modes. k indicates a wave vector of the light traveling in a CDW. In the process of deriving (1), the following are assumed: 1) the individual defect modes are strongly localized; 2) interactions between these localized modes are weak; 3) interactions other than those between the nearest neighbor localized modes can be disregarded.

A group velocity Vg of the light propagating in the coupled defects is represented by the following equation:

$$\begin{aligned} Vg &= \frac{d\omega}{dk} = -\kappa R \Omega \sin(kR) \\ &= -R \Omega \sqrt{\kappa^2 - (\omega/\Omega - 1)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

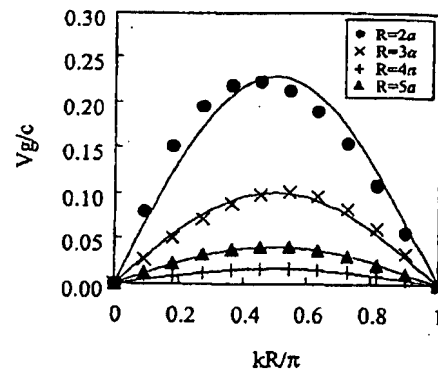


Fig. 6. Normalized group velocity diagrams. As in Fig. 4, symbols represent the result of plane-wave method and lines the plot of (2). As the coupling factor, listed values in Table I are used.

TABLE I
LIST OF THE VALUES OF κ AND $\Delta\alpha$. THEY ARE DERIVED FROM THE RELATIONS OF $|\kappa| = \Delta\omega/2\Omega$ AND $\Delta\alpha = 2 - (\omega_{\max} + \omega_{\min})/\Omega$, WHICH MEANS FITTING IN DISPERSION DIAGRAM

R	$ \kappa $	$\Delta\alpha$
$2a$	4.68E-02	-2.41E-03
$3a$	1.38E-02	-5.26E-04
$4a$	4.14E-03	2.18E-04
$5a$	1.35E-03	3.21E+00

It is understood from (1) and (2) that transmission can only occur in the region between $\omega = (1 - \kappa)\Omega$ and $\omega = (1 + \kappa)\Omega$. In this frequency range, group velocity follows a sine curve; $|Vg|$ takes a maximum value $|\kappa R \Omega|$ when $\omega = \Omega$, while it takes the minimum value of 0 when $\omega = (1 \pm \kappa)\Omega$.

Fig. 5 compares the dispersion relation calculated using the plane-wave method (symbols) and the TB model calculation (solid line). Here, the amplitudes of κ and $\Delta\alpha$ are determined using the following relation: $|\kappa| = \Delta\omega/2\Omega$ and $\Delta\alpha = 2 - (\omega_{\max} + \omega_{\min})/\Omega$. The derived values are listed in Table I. As seen in this table, κ decreases rapidly as the defect separation R increases. This corresponds to the picture that the coupling between defects is getting weak as the defects separate from each other.

The charts in Fig. 5 show good agreement between curves and symbols; the TB model reproduces well the trend of the change in frequency. When one looks at the details, it is apparent that the agreement between the symbols and curve in Fig. 5 became better as R is increased. This can be explained as follows. Since the TB model considers only the interactions between the nearest neighboring localized modes, it cannot be a good approximation when interactions with the defects other than the nearest neighbor remain. In our calculation, as the defect separation becomes large, the interaction between localized modes becomes small; thus, the TB model is able to describe the phenomenon better.

Fig. 6 shows the absolute value of the group velocities of transmitted light by a CDW as a function of kR/π . In Fig. 6, the symbols denote Vg/c from the plane-wave-method calculation and the curves are a plot of (2). The values of κ listed in Table I are used as the coupling factor in the TB model. Note the values

of κ that are derived by fitting the normalized-frequency curves also provides good agreement in the group velocities.

The Vg/c takes on its maximum value at the band center; i.e., 0.229, 0.101, 0.041, and 0.016 for $R = 2a, 3a, 4a$, and $5a$, respectively. This result indicates that group velocities of the light traveling in the CDW is only 1.6% to 23% and these group velocities have a large R dependence. As shown by (3), Vg depends on both R and κ . However, a decrease in κ is more influential than an increase in R , because κ changes more drastically than R . Accordingly, the group velocity decreases rapidly when the defect separates further. It is important to note that the extremely small group velocities, such as those shown here, point to the possibility of various applications as well as its use as a dispersion compensator.

IV. DISPERSION OF THE LIGHT IN THE CDW

As discussed in the preceding section, the TB approximation showed good agreement with the *ab initio* result, and we certified the adequacy of applying the TB model to the coupled defect waveguide system. Consequently, we concluded that a reliable value of the wavelength dispersion is given by using the TB model.

A wavelength dispersion D is given by the following equations:

$$D = \frac{d(1/Vg)}{d\lambda} = \frac{1}{2\pi Rc} \eta(\eta+1)^2(\kappa^2 - \eta^2)^{-3/2}$$

$$\eta = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \quad \lambda_0 = \frac{2\pi c}{\Omega} \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (3)$$

where λ_0 means the resonant wavelength of a single cavity and λ corresponds to the operation wavelength. As described in Section II, in our structure, the resonant frequency of the single-defect state is given by $\Omega a/2\pi c = 0.3896$. Thus, we obtain the relation between lattice constant a and resonant wavelength λ_0 : $\lambda_0 = 0.3896a$. Consequently, the required lattice constant a is $0.604 \mu\text{m}$ when we set the resonant wavelength λ to $1.55 \mu\text{m}$.

Fig. 7 shows the wavelength dispersion calculated using (3). Note that the ranges of the horizontal and vertical axes are adjusted in each chart so that they are intelligible. In each chart, the dispersion curves show the same trend. That is, the dispersion value D changes almost linearly in the central region, while it changes drastically around the band edge. We focus the discussion on this central gentle inclination region, because it is suitable for device applications. When $R = 2a$, D changes from -0.2 to 0.2 ps/nm/mm in the linear region; in the same manner, ranges of D are ± 2 ps/nm/mm, ± 10 ps/nm/mm and ± 80 ps/nm/mm for $R = 3a, 4a$, and $5a$, respectively. It should be noted that these absolute dispersion values of CDW are quite large. For example, the dispersion value of 10 ps/nm/mm, which is obtained when $R > 4a$, is over five orders of magnitude than that of a DCF whose dispersion is a few tens of picoseconds/nanometers/kilometers. Therefore, this CDW can provide a compact dispersion compensator of a few tens of millimeters scale.

As shown above, there is a large R dependence of the D range as well as in bandwidth, whereas the shapes of the dispersion curves are independent of R . As discussed in the argument about group velocities, the change in κ accompanying the change in R

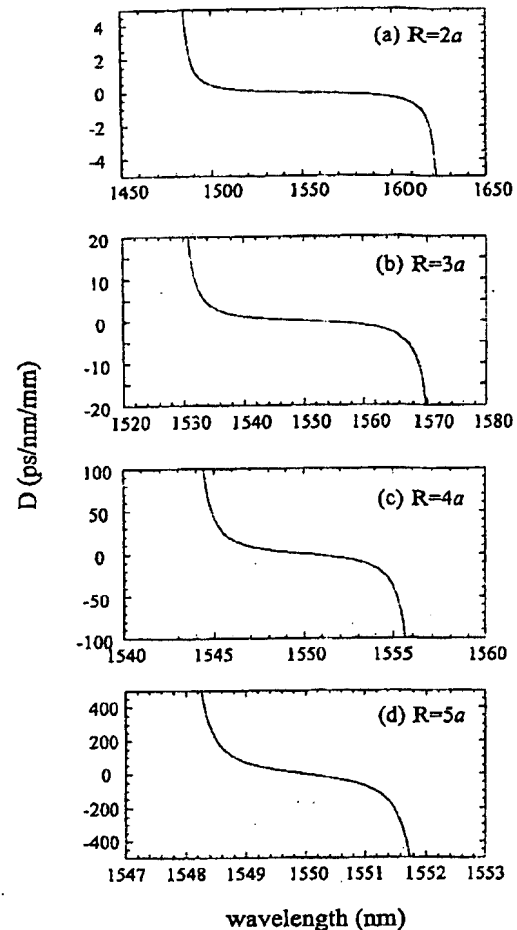


Fig. 7. Calculated dispersion value for (a) $R = 2a$, (b) $3a$, (c) $4a$, and (d) $5a$. The vertical and horizontal ranges are adjusted in each chart.

mainly contributes to the R dependence of the dispersion characteristics. In other words, κ is the most essential parameter that determines the characteristics of the light, such as the dispersion range. Consequently, the control of κ should be taken into consideration in the design of an actual device.

Next, we would like to discuss an actual application to a practical system. In a high-bit-rate WDM optical communication system, the signal pulses are individually reshaped in each channel after being demultiplexed, where a tunable dispersion compensator is required because the dispersion must be precisely compensated. The principle of tuning is as follows. When the refractive index of a dielectric material changes, the eigenfrequency of the single-defect state Ω shifts. Since this change in the eigenfrequency causes a shift of the dispersion curve, the dispersion value also shifts for the fixed operation wavelength. Consequently, we can control the dispersion value by changing the refractive index of the material. Fig. 8 shows the dispersion change as a function of the refractive-index-change rate. As can be seen in this chart, a 0.6% change in the refractive index induces an 8-ps/nm/mm change in dispersion. Therefore, only a 20-mm length of the waveguide can tune a dispersion up to ± 160 ps/nm, which is enough to compensate for the dispersion caused in a few-kilometers-long optical communications

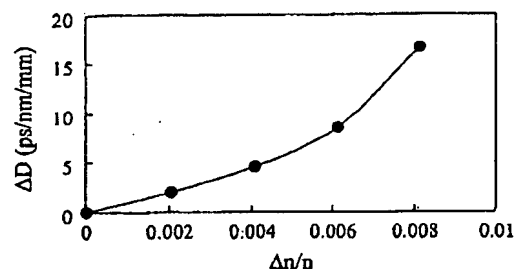


Fig. 8. Relation between induced refractive index change and change in dispersion value.

system. Therefore, the coupled defect waveguide has a potential advantage for exploiting the tunability of the dispersion.

V. SUMMARY

We have discussed the characteristics of a photon traveling through a coupled defect waveguide in a photonic crystal. We first calculated the propagation characteristics by solving Maxwell's equations using the plane-wave method. It was shown that the CDW band appears within the bandgap and its characteristics are well reproduced by the tight-binding model, which is analogous to the description of an electronic system in solid-state physics. Then, we presented a dispersion compensator that uses the characteristics of a CDW. Due to the inherent large dispersion of the light propagating in the coupled defect system, an extremely small dispersion compensator of a few tens of millimeters in size can be achieved. Moreover, a tunable compensator that meets the requirements of optical communications systems can be realized by inducing a small refractive index change. We believe that a dispersion compensator using a CDW can become a photonic crystal device that is commercially provided in the near future.

REFERENCES

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059–2062, May 1987.
- [2] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of the Light*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1995.
- [3] S. Fan, P. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Channel drop through localized states," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, pp. 960–963, Feb. 1998.
- [4] O. J. Painter, A. Husain, A. Scherer, J. D. O'Brien, I. Kim, and P. D. Dapkus, "Room temperature photonic crystal defect lasers at near-infrared wavelength in InGaAsP," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 2082–2088, Nov. 1999.
- [5] J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, "Photonic band gap guidance in optical fibers," *Science*, vol. 282, pp. 1476–1478, Nov. 1998.
- [6] Y. Ohtera, T. Sato, T. Kawashima, T. Tamamura, and S. Kawakami, "Photonic crystal polariton splitters," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1271–1272, Jul. 1999.
- [7] A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, S. Fan, P. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 3787–3790, Oct. 1996.
- [8] J. D. Joannopoulos, P. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals: Putting a new twist on light," *Nature*, vol. 386, pp. 143–149, Mar. 1997.
- [9] H. Benisty, "Modal analysis of optical guides with two-dimensional photonic band-gap boundaries," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, pp. 7483–7492, May 1996.
- [10] S. G. Johnson, P. R. Villeneuve, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, "Linear waveguides in photonic-crystal slabs," *Phys. Rev. B*, vol. 62, pp. 8212–8222, Sep. 2000.

- [11] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," *Nature*, vol. 407, pp. 606–610, Oct. 2000.
- [12] T. Baba, N. Fukuya, and J. Yonekura, "Observation of light propagation in photonic crystal optical wavelength with bends," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 654–655, Apr. 1999.
- [13] M. Loncar, D. Nedeljkovic, T. Poll, J. Vuckovic, A. Scherer, and T. Pearsall, "Waveguide in planar photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, pp. 1937–1939, Sep. 2000.
- [14] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Seto, and S. Kawakami, "Photonic crystals for micro light wave circuits using wavelength-dependent angular beam steering," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 1370–1372, 1999.
- [15] N. Stefanou and A. Modinos, "Impurity bands in photonic insulators," *Phys. Rev. B*, vol. 57, pp. 12 127–12133, May 1998.
- [16] A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee, and A. Schere, "Coupled-resonator optical waveguide: A proposal analysis," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 711–713, Jun. 1999.
- [17] M. Bayer, T. Gutbrod, A. Forchel, T. L. Reinecke, P. A. Kunipp, R. Werner, and J. P. Reithmaier, "Optical demonstration of a crystal band structure formation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 83, pp. 5374–5377, Dec. 1999.
- [18] M. Bayindir, B. Temelkuran, and E. Ozbay, "Tight-binding description of the coupled defect modes in three-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 2140–2143, Mar. 2000.
- [19] —, "Propagation of photons by hopping: A waveguiding mechanism through localized coupled cavities in three-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 61, pp. R11855–R11858, May 2000.
- [20] S. Lan, S. Nishikawa, and O. Wada, "Leveraging deep photonic band gaps in photonic crystal impurity bands," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 2101–2103, Apr. 2001.
- [21] O. Johnson, MIT Photonic-Bands (MPB). [Online]. Available: <http://ab-initio.mit.edu/mpb/>
- [22] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis," *Opt. Exp.*, vol. 8, pp. 173–190, 2001.
- [23] C. Martijn de Sterke, "Superstructure gratings in the tight-binding approximation," *Phys. Rev. E*, vol. 57, pp. 3502–3509, Mar. 1998.
- [24] E. Lidorikis, M. M. Sigalas, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Tight-binding parametrization for photonic band gap material," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, pp. 1405–1408, Aug. 1998.



Kazuhiko Hosomi was born in Kyoto Prefecture, Japan, in 1966. He received the B.S. and M.S. degrees in physics from Tohoku University, Sendai, Japan, in 1990 and 1992, respectively.

Since April 1992, he has been with the Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo, Japan. He was engaged in research on the crystal growth technology of InP and its related matter and also on quantum function devices. Since 2000, he has been researching photonic crystals.



Toshio Katsuyama was born in Ibaraki Prefecture, Japan, in 1949. He received the B.S. and M.S. degrees in physics and the Ph.D. degree in applied physics, all from Tohoku University, Sendai, Japan, in 1972, 1974, and 1983, respectively.

He joined Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo, Japan, in 1974, where he was engaged in research on optical fibers, semiconductor integrated optics, and graphite intercalation compounds. His current research interest includes ultrafast semiconductor physics and the fabrication and characterization of quantum functional devices. He is the author of the book entitled *Infrared Optical Fibers* (New York: Adam Hilger).

Dr. Katsuyama's patent "Single Polarization Optical Fibers" was selected as one of the excellent patents by Japanese Science and Technology Agency in 1985. He was awarded an R&D 100 Prize for his contribution to the development of optical fiber gyroscopes in 1993. He is a member of the Japanese Society of Applied Physics and the Physical Society of Japan.